Česká zemědělská univerzita v Praze
Fakulta lesnická a dřevařská
Katedra lesnických technologií a staveb

Analýza objemových rozdílů dříví vyrobeného harvestory v závislosti na aplikaci rozdílných typů cen a metod odpočtu kůry

Disertační práce

Autor: Ing. Monika Löwe
Školitel: doc. Ing. Jiří Dvořák, Ph.D.

Praha 2024

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta lesnická a dřevařská

ZADÁNÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Monika Löwe

Lesní inženýrství

Zpracování dřeva a technika v lesním hospodářství

Název práce

Analýza objemových rozdílů dříví vyrobeného harvestory v závislosti na aplikaci rozdílných typů cen a metod odpočtu kůry

Název anglicky

Analysis of volume differences of timber produced by harvesters related to the price types and bark deduction methods applied

---

Cíle práce

(i) Analýza typů cen a metod odpočtu kůry popsaných ve standardu StanForD, určení rozdílů mezi těmito nastavitelnými parametry a doporučení vhodného nastavení těchto parametrů v softwaru stroje pro využití v podmínkách lesního hospodářství České republiky.

(ii) Porovnání objemů výřezů s kůrou a bez kůry stanovených dle vybraných typů cen a metod odpočtu kůry při výrobě dříví harvestorovou technologií, včetně analýzy objemových rozdílů mezi jednotlivými vyráběnými skupinami sortimentů u vybraných druhů jehličnatých dřevin.

(iii) Analýza vhodnosti využití lineární metody, sestrojené pro růstové podmínky dřevin v ČR, ve výrobně-evidenčním softwaru stroje v porovnání s metodou pásmových srážek pro odpočet dvojnásobku tloušťky kůry u vybraných druhů jehličnatých dřevin.

Metodika

(i) Analýza typů cen a metod odpočtu kůry využívaných a popsaných v dokumentaci StanForD.

(ii) Aplikace typů cen a metody odpočtu kůry popsané v dokumentaci a využitelné ve výrobních podmínkách ČR na reálně vyrobené dříví harvestorovou technologií.

(iii) Porovnání výsledných objemů bez kůry vybraných jehličnatých dřevin s běžně využívanými metodami odpočtu dvojnásobku kůry v ČR (např. ČSN 48 0009).

(iv) Pro provedení analýz budou výřezy vybraných dřevin rozděleny do jednotlivých skupin vyráběných sortimentů.

(v) Zpracování statistické analýzy v softwarech Statistica a R.

Pracovní harmonogram:

říjen 2016 – prosinec 2017: literární rešerše,

leden 2017 – září 2018: sběr dat,

říjen 2018 – únor 2019: analýza dat, návrh kategorizace dat,

březen 2019 – březen 2020:publikování výsledků,

červen 2019 – září 2020: zpracování dizertační práce.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE
1906

Doporučený rozsah práce

100 NS (vč. příloh)

Klíčová slova

StanForD, výrobně-evidenční software, tloušťka kůry, soubor STM, pásmový odpočet kůry, lineární model odpočtu kůry, objem dříví

Doporučené zdroje informací

ČSN. 1977. STANDARD N. 48 0009: Tabulky objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře. ČR, Praha, 1977, 592 p..

DVOŘÁK J. – BYSTRICKÝ R. – HOŠKOVÁ P. – HRIB M. – JARKOVSKÁ M. – KOVÁČ J. – KRILEK J. – NATOV P. – NATOVOVÁ L. The use of harvester technology in production forests. Folia Forestalia Bohemica. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce, s.r.o., 2011, 156 p.

HUSCH, B. – BEERS, T. W. – KERSHAW, J. A. Forest Mensuration, 4th ed.; John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 2003; 443 p. ISBN 978-0-471-01850-6.

LEITNER T. – STAMPFER K. – VISSER R. Analysing log length measurement accuracy of harvester and processor heads. Austrian Journal of Forest Science, 2014, 131: 129–146.

NATOV P. – DVOŘÁK J. – JANKOVSKÝ M. Guidelines for Scaling Timber by Harvesters in the Czech Republic 2018, Prague: ČZU v Praze, 2020, 96 p.

SPINELLI, R. – HARTSOUGH, B. R. – MAGAGNOTTI, N. Productivity Standards for Harvesters and Processors in Italy. Forest Products Journal, 2010, 60: 226-235.

STANFORD. Standard for Forest Data and Communications. Appendix: Definitions of variables – General and country specific. Version (last update 2012-04-18) [online]. The Forest Research Institute of Sweden. Upssala, 2012, 32 p.

WOJNAR T. et al. Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v ČR 2008. Kostelec nad Černými lesy: Lesnická práce s.r.o., 2007, 147 p.

Předběžný termín
2020/21 LS – FLD – SDZ

Vedoucí práce
doc. Ing. Jiří Dvořák, Ph.D.

Garantující pracoviště
Katedra lesnických technologií a staveb

Konzultant
Ing. Bc. Pavel Natov, Ph.D.

Elektronicky schváleno dne 30. 10. 2020
doc. Ing. Miroslav Hájek, Ph.D.
Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 04. 01. 2021
doc. Ing. Milan Gaff, PhD.
Předseda oborové rady

Elektronicky schváleno dne 26. 01. 2021
prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.
Děkan

V Praze dne 27. 04. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Analýza objemových rozdílů dříví vyrobeného harvestory v závislosti na aplikaci rozdílných typů cen a metod odpočtu kůry“ vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací a doporučení školitele. Souhlasím se zveřejněním disertační práce dle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách v platném znění, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Praze dne 2. září 2024 Ing. Monika Löwe

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala všem, kteří mě podporovali a motivovali během mého studia a při psaní této disertační práce. Především děkuji svému vedoucímu práce doc. Ing. Jiřímu Dvořákovi, Ph.D. a konzultantovi Ing. Bc. Pavlu Natovovi, Ph.D. za cenné rady, trpělivost a odborné vedení. Dále děkuji spoluautorům vědeckých článků. Také bych ráda poděkovala za poskytnutou finanční podporu. Publikované články, které tvoří součást této disertační práce, byly financovány z grantů IGA FLD A29/17; A/08/18; NAZV QJ1520005. V neposlední řadě děkuji své rodině za jejich trpělivost a podporu po celou dobu mého studia.

Abstrakt

Očekává se, že harvestorová technologie bude navzdory změnám ve skladbě lesních porostů po nedávné kůrovcové kalamitě a zintenzivnění využívání přírodě blízkého hospodaření v lesích i nadále ve velké míře využívána. V České republice se v roce 2022 harvestory podílely na 43 % těžby. Publikované články v této práci měly za cíl analyzovat typy cen pro stanovení objemu výřezů a metody odpočtu kůry využitelné ve standardu StanForD, včetně analýzy objemových rozdílů mezi jednotlivými vyráběnými skupinami sortimentů. Analyzováno bylo 14 typů cen nastavitelných v softwaru harvestoru v podmínkách výroby smrkového dříví a 2 metody odpočtu kůry (pásmová a lineární) využitelné v softwaru harvestoru při výrobě dříví borovice a modřínu. V softwaru harvestoru totiž nelze využít pro odpočet kůry nelineární parametrickou (polynomickou) metodu. Bylo zjištěno, že 14 typů cen je založeno na 7 různých algoritmech (A1-A7) pro stanovení objemu výřezů. Algoritmus A2 (typ ceny M3s) poskytoval nejpřesnější stanovení objemů ve srovnání se skutečnými objemy výřezů. Algoritmus A5 (typ ceny M3toDE), využívaný v podmínkách lesního hospodářství střední Evropy, podhodnocoval objemy smrkové kulatiny o více než 6 % ve srovnání s algoritmem A2. Podobné výsledky byly zjištěny i u borovicového dříví, kde podhodnocení objemu bylo o 6,48 % a u modřínového dříví 5,59 %. Zjištěny byly také významné rozdíly mezi pásmovým odpočtem kůry a parametrickým lineárním odpočtem kůry používanými v softwarech harvestorů. Pro odpočet kůry u borovice lesní doporučujeme v softwaru harvestoru využít metodu odpočtu kůry podle pásmových odpočtů, u modřínového dříví lze volit mezi metodou lineární i pásmovou. Výsledky práce zdůrazňují potřebu detailní znalosti fungování výrobně-evidenčních softwarů harvestorů pro zajištění validity výstupních dat evidence vyrobeného dříví. Správné nastavení strojů také umožní jejich efektivní využívání a při prodeji modřínového dříví může mít také pozitivní vliv na příjmy z prodeje dříví.

Klíčová slova: sortimentní metoda, StanforD, metody odpočtu kůry, typy cen, dvojitá tloušťka kůry

Abstract

It is expected that harvester technology will continue to be widely used despite changes in forest stand composition following the recent bark beetle outbreak and the intensified use of close-to-nature forest management. Harvesters produced 43 % of timber in Czechia in 2022. The articles published in this thesis aimed to analyze the price categories for estimating log volume and bark deduction methods that can be set up in the StanForD standard, including an analysis of volume differences between various produced assortment groups. Fourteen price categories adjustable in harvester software for spruce timber production and two bark deduction methods (diameter band bark deduction method and parametric linear bark deduction method) applicable in harvester software for pine and larch timber production were analyzed. Non-linear parametric (polynomial) methods cannot be used for bark deduction in harvester software. We analyzed fourteen price categories and found seven different algorithms used to estimate the log volumes (A1-A7). Algorithm A2 (price category M3s) provided the most accurate volume estimates compared to the real log volumes. Algorithm A5 (price category M3toDE), used in Central European forestry, underestimated spruce roundwood volumes by more than 6 % compared to Algorithm A2. Similar results were found for pine timber, with an underestimation of 6.48 %, and for larch timber, with an underestimation of 5.59 %. Significant differences were also found between the diameter band bark deduction method and the parametric linear bark deduction method used in the harvester software. For pine bark deduction, we recommend using the method of bark deduction according to diameter band deductions in the harvester software, for larch timber you can choose between the linear and diameter band method. The results of the study highlight the need for detailed knowledge of the functioning of harvester production and record-keeping software to ensure the validity of output data on produced timber. Proper harvester's settings also enable efficient use and can positively impact revenue from larch timber sales.

Keywords: assortment method, StanfordD, bark deduction methods, price types, double bark thickness

Obsah

1 Úvod 12
2 Cíle práce 15
3 Literární rešerše 16
3.1 Lesy a těžba 16
3.2 Vývoj mechanizace v lesnictví 17
3.3 Harvestorová technologie 19
3.4 Sortimentní těžební metoda 22
3.5 Potenciál využití harvestorů v ČR 24
3.6 Dřeviny vhodné pro výrobu surového dříví harvestory 26
3.6.1 Smrk ztepilý 27
3.6.2 Borovice lesní 28
3.6.3 Modřín opadavý 29
3.7 StanForD 30
3.8 Zjišťování objemu výroby z prvotní evidence harvestorů 31
3.9 Kontrolní měření a kalibrace 34
3.10 Kůra stromů 35
3.11 Prodej dříví bez kůry 38
4 Metodika 43
4.1 Sběr dat 43
4.2 Zpracování a kategorizace dat 44
4.2.1 Objem s kůrou a bez kůry u borovice a modřínu 44
4.2.2 Typy cen a jejich algoritmy pro stanovení objemu 46
4.3 Statistická analýza 46
5 Přehled publikovaných prací 47
5.1 Zjišťování objemu dříví borovice lesní vyrobeného harvestory s kůrou a bez kůry 47

5.2 Stanovení objemu modřínového dříví s kůrou a bez kůry vyrobeného harvestory 65
5.3 Rozdíly mezi stanovením objemu dříví za využití různých algoritmů dostupných ve výrobně-evidenčních systémech harvestorů 76
5.4 Další publikované články 91
6 Diskuze 92
6.1 Objem dříví s kůrou a bez kůry u modřínu 93
6.2 Objem dříví s kůrou a bez kůry u borovice 94
6.3 Typy cen a jejich algoritmy pro stanovení objemu 95
7 Závěr a doporučení pro praxi 99
8 Seznam použitých zkratek 101
9 Seznam tabulek a obrázků 102
10 Seznam citované literatury 103

1 Úvod

V posledních letech zaznamenáváme v Evropě dynamický růst využívání harvestorové technologie spojené se sortimentní těžení metodou při výrobě surového dříví (Moskalik et al., 2017). Při metodě sortimentní (v angličtině cut-to-length (CTL) – řezáno na délku), se provádí druhování na základě stanovených parametrů, druhu dřeviny a kvality dřeva (tj. výroba sortimentů) přímo na místě, kde probíhá těžba. Tato metoda je také označována jako severská/skandinávská metoda těžby (Talbot et al., 2003). Důvodem je, že tato metoda je v zemích jako Finsko, Švédsko, Norsko, Estonsko téměř výhradně využívána pro těžbu dříví (Gellerstedt & Dahlin, 1999; Lundbäck et al., 2021; Moskalik et al., 2017). Harvestorová technologie, která je se sortimentní těžební metodou spojena, je vhodná pro těžbu převážně v jehličnatých porostech (Dvořák et al., 2012). Ostatní dřeviny jsou zatím z technologického hlediska pro zpracování problematické (Mederski et al., 2018).

Podíl vytěženého dříví harvestory se v Česku v posledních deseti letech neustále zvyšoval a v roce 2022 dosáhl 45 %. V provozu je v současnosti u nás celkem 1 099 harvestorů, z toho 1 062 na kolovém podvozku a 37 na pásovém. Z těchto strojů je 803 pro těžbu mýtní a kalamitní s kácecími hlavicemi s úřezem do 62, 72 a 75 cm. Pro výchovné zásahy v předmýtních porostech zde pracuje 259 strojů vybavených kácecími hlavicemi s úřezem do 55 cm (MZe, 2023). K nárůstu zastoupení této technologie u nás v celkové těžbě dříví v posledních letech přispěla nejvíce nahodilá těžba pro likvidaci ohnisek lýkožrouta smrkového (*Ips typographus*) ve smrkových lesích. Jako příklad lze uvést rok 2019, kdy podíl těžeb jehličnatého dříví na celkových těžbách činil přibližně 96 %. Proporce těžby byla dána zpracováním nahodilých těžeb, zejména tzv. kůrovcového dříví (MZe, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023).

Dříví představuje klíčový zdroj příjmů v lesnictví. Kromě kvality, která ovlivňuje jednotkovou cenu, je nutné co nejpřesněji stanovit objem nebo hmotnost pro určení množství obchodovatelného dříví. Pouhé kvantifikované odhady objemu či hmotnosti dříví mohou negativně ovlivnit ekonomickou životaschopnost lesnických podniků a vlastníků lesů (Edwards, 1998). Harvestory automatizují měření rozměrů výřezů a následně provádí stanovení objemu. Pokud je stroj správně kalibrován a nastaven, mohou být výstupy z jeho výrobně-evidenčního systému považovány za přesné (Sládek & Neruda, 2007). Ačkoli harvestory jsou schopny měřit délky s přesností na centimetry

a tloušťky na milimetry, české lesnictví postrádá standard, který by upravoval přijímání těchto měření do oficiálních záznamů. To platí také pro Německo a další evropské země (Hohmann et al., 2017). Aby byly výstupy z harvestorů považovány za důvěryhodné a transparentní pro lesní hospodářskou evidenci, je nutné, aby lesnická komunita byla obeznámena s fungováním výrobně-evidenčních softwarů strojů a přijala jednotnou metodiku pro jejich užívání.

Výrobci dodávají harvestory vybavené softwarem fungujícím na základě standardu StanForD, který slouží ke komunikaci a přenosu dat v počítači harvestoru (Natov & Dvořák, 2018). Tento software komunikuje s měřicími senzory na hlavici harvestoru a převádí získané impulsy na data s hodnotou délky a tloušťky. StanForD nabízí celkem čtrnáct typů cen, které určují algoritmus pro výpočet objemu z naměřených rozměrů a zároveň stanovují parametr (vybranou tloušťku) pro výrobu konkrétního sortimentu (Sládek & Neruda, 2007; Skogforsk, 2012). Aby bylo možné efektivně využívat harvestorovou technologii, musí být prostudovány všechny její relevantní technologické a technické parametry a vlastnosti. Mnoho aspektů již bylo podrobně zkoumáno, jako poškození výřezů hroty podávacího válce (Gerasimov et al., 2012; Karaszewski et al., 2018; Nuutinen et al., 2010), dopady těžkých strojů na půdu (Marusiak & Neruda, 2018), účinnost a výkon harvestorů (Apăfăian et al., 2017; Mederski et al., 2018), optimalizace druhování (Labelle & Huss, 2018), analýza spotřeby času (Nurminen et al., 2006; Pajkoš et al., 2018; Szewczyk & Sowa, 2017) práce operátorů harvestorů (Purfuerst, 2010), nicméně výrobně – evidenčnímu softwaru nebyla věnovaná taková pozornost. Třetí článek této práce proto porovnává různé metody stanovení objemu smrkových výřezů nastavené ve výrobně-evidenčním systému harvestorů ve spojení s různými typy cen.

Aby bylo možné určit objemovou produkci dříví, musí být mimo jiné přesně stanovena tloušťka kůry (Costa et al., 2021). Stanovení objemu kůry jsou pro lesníky velmi důležité, protože potřebují znát obchodovatelné objemy kmenů bez kůry a odečítání předem stanovených objemů kůry od celkového objemu výřezu poskytuje nejpohodlnější výpočetní metody (Jang et al., 2016). Z této skutečnosti vyplývá fakt, že v téměř celé Evropě (s výjimkou např. Finska) se dříví měří s kůrou, ale obchoduje se bez ní. To znamená, že zákazníci dostávají kůru zdarma, což jim umožňuje ji dále využívat a profitovat z ní (Jankovský et al., 2023). Smrku v souvislosti s kůrou byla již věnována

značná pozornost, proto je první a druhý článek této práce zaměřen na další významné hospodářské jehličnaté dřeviny těžené harvestory v ČR, a to konkrétně borovici a modřín.

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) je jednou z komerčně nejvýznamnějších dřevin v Evropě (Roszyk et al., 2020). Podle údajů Ministerstva zemědělství České republiky (MZe, 2023) tvoří borovice lesní přibližně 16 % dřevinné skladby českých lesů a je druhou nejzastoupenější dřevinou po smrku. Často se vyskytuje na chudých půdách; jako pionýrský druh je vysazována za účelem protierozních opatření; je meliorační dřevina a větrolam, a využívá se také k výrobě bioenergie, buničiny a řeziva. Její dřevo je pevné a snadno zpracovatelné, běžně používané v nábytkářském a stavebním průmyslu (Auty et al., 2014; Cao et al., 2015; Gardner, 2013; Routa et al., 2011).

Modřín evropský (*Larix decidua* Mill.) je jehličnatý strom vhodný pro výrobu dříví harvestory. V roce 2022 pokrýval přes 102 000 hektarů českých lesů, což představovalo 3,9 % jejich dřevinné skladby. Byl tak třetím nejzastoupenějším jehličnanem po smrku (46,8 %) a borovici (16,0 %). Modřín se využívá hlavně pro pěstování smíšených porostů a zvýšení druhové rozmanitosti lesů. V roce 2022 byl použit při umělé obnově lesů po lýkožroutu smrkovém na ploše téměř 2000 hektarů (tj. 5 % z celkové roční uměle zalesněné plochy). Doporučená dřevinná skladba předpokládá zvýšení podílu modřínu na 4,2 %. S ohledem na jeho častou příměs ve smrkových a borových porostech lze očekávat vyšší objemy modřínového dříví při zpracování harvestorovou technologií (MZe, 2023).

Disertační práce se věnuje problematice korektního a úplného nastavení specifických parametrů ve výrobně-evidenčním softwaru harvestorů, a to konkrétně pro stanovení objemu vyrobeného dříví s využitím různých typů cen a metod odpočtu kůry. Pochopení fungování softwaru a jeho správné nastavení zajistí validitu výstupních dat elektronického měření dříví harvestorem a kompatibilitu vyrobeného objemu při porovnání výroby se standartními postupy a metodami využívanými pro lesní hospodářskou evidenci a pro obchodování se dřívím v podmínkách ČR.

2 Cíle práce

Tato práce se věnuje evidenci dříví vyrobeného harvestorovou technologií a nastavení konkrétních a validních parametrů výroby ve výrobně-evidenčním softwaru harvestoru. Hlavní cíle práce byly následující:

(i) Analýza typů cen a metod odpočtu kůry popsaných ve standardu StanForD, určení rozdílů mezi těmito nastavitelnými parametry a doporučení vhodného nastavení těchto parametrů ve výrobně-evidenčním softwaru harvestorů pro využití v podmínkách lesního hospodářství České republiky.

(ii) Porovnání objemů výřezů s kůrou a bez kůry stanovených dle vybraných typů cen a metod odpočtu kůry při výrobě dříví harvestorovou technologií, včetně analýzy objemových rozdílů mezi jednotlivými vyráběnými skupinami sortimentů u vybraných druhů jehličnatých dřevin.

(iii) Analýza vhodnosti využití lineární metody pro odpočet objemu kůry, sestrojené pro růstové podmínky dřevin v ČR, ve výrobně-evidenčním softwaru stroje v porovnání s metodou pásmových srážek pro odpočet tloušťky kůry u vybraných druhů jehličnatých dřevin.

Porozumění nastavení výrobně-evidenčního softwaru harvestorů a rozdílů mezi evidencí výroby dříví při různém nastavení typů cen a odpočtu kůry poskytne uživatelům užitečné informace pro aplikovanou evidenci objemu vyrobeného dříví při správě lesů. Chybné nastavení strojů totiž může uvádět nesprávné údaje generované softwarem na výstupech evidence výroby dříví, což může nejen významně ovlivnit příjmy z prodeje dříví, ale také negativně ovlivnit důvěryhodnost údajů z elektronického příjmu dříví harvestory.

3 Literární rešerše

3.1 Lesy a těžba

Lesy jsou nedílnou součástí biosféry a pokrývají 31 % celosvětové rozlohy země. Nejsou však rovnoměrně rozmístěny po celém světě. Více než polovina plochy lesů se nachází pouze v pěti zemích (Brazílie, Kanada, Čína, Ruská federace a Spojené státy americké). V lesích se nachází většina suchozemské biodiverzity Země, poskytují útočiště pro více než 80 % všech suchozemských živočišných a rostlinných druhů. Stromy jsou definujícím prvkem lesního ekosystému (FAO, 2020). Lesy poskytují lidstvu cenné produkty a ekosystémové služby včetně potravy, dřeva, léčiv, čisté vody a estetických či duchovních hodnot (McKinley et al., 2011). Poskytují hlavní obnovitelné přírodní zdroje, které přispívají do světového hospodářství, čímž se lesnický průmysl stává potenciálně důležitou součástí bioekonomiky budoucnosti (Eriksson et al., 2017). Zatímco ve většině světa dochází k výraznému úbytku lesů, Evropa se v posledních 100 letech vyznačuje nepřetržitým nárůstem rozlohy lesů. V současné době je více než třetina celkové plochy Evropy, což odpovídá 227 miliónů ha, pokryta lesy (SEF, 2020). Lesy jsou klíčovým prvkem v bioekonomice a zmírňují dopady klimatické změny díky ukládání uhlíku (Pucher et al., 2023). Stromy jsou dlouhověké a lesy tak ukládají uhlík po dlouhou dobu (McKinley et al., 2011). Atmosférický uhlík je vázán do biomasy a také půdy, čímž se lesy stávají rozsáhlou a trvalou zásobárnou uhlíku. Obsahují dokonce v biomase a půdě více uhlíku, než je uloženo v atmosféře (Pan et al., 2011). Zajištění trvalé udržitelnosti je pro lesní hospodářství klíčové a je v souladu s cíli Nové strategie EU pro lesnictví do roku 2030, kterou stanovila Evropská komise (European Commission, 2021).

Lesy využívají lidé od nepaměti, a právě těžba dříví je jednou z činností, které lidstvo zná již velmi dlouho (Moskalik et al., 2017). Už od pradávna lidé využívali dřevo. Používalo se na výrobu nástrojů, dopravních prostředků, jako palivo, stavební materiál a mnoho dalšího (Silversides, 1997). Těžba dříví je jednou ze základních součástí lesního hospodářství, protože umožňuje dodávat dříví průmyslovým odvětvím i přímým spotřebitelům (Brown, 1949). Každý rok se po celém světě vytěží 1,9 miliard m^3 průmyslové kulatiny bez kůry. Z tohoto množství pochází 1 miliarda m^3 z pěti zemí: USA, Ruska, Číny, Kanady a Brazílie. Dalších 250 miliónů m^3 je

produkováno Švédskem, Indonésií, Finskem a Indií, zatímco zhruba 200 zemí tvoří zbytek, každá z nich produkuje méně než 50 miliónů m^3 ročně (FAO, 2016).

3.2 Vývoj mechanizace v lesnictví

Lesnictví se výrazně vyvinulo od prvních strojů postavených z upravených traktorů až po dnešní moderní hydraulické stroje (Nordfjell et al., 2019). Po dlouhou dobu byly lesnické práce prováděny převážně ručně s použitím pil, seker a s pomocí animální síly. Mechanizace v lesnictví však začala mnohem později než mechanizace zemědělství (Brown, 1949; Silversides, 1997; Sundberg, 1978), a to zavedením motorových pil pro těžbu a traktorů pro přibližování dříví (Ringdahl, 2011).

První motorové pily, které byly dostatečně lehké, aby je mohli ovládat dva lidé, vznikly v letech 1916–1917 v Kanadě a Švédsku (Silversides, 1997; Sundberg, 1978). V roce 1938 fungovala v Kanadě pouze jedna továrna na jejich výrobu, do roku 1942 tento počet vzrostl na šest a do roku 1949 na třicet (Silversides, 1997). V průběhu třech desetiletí bezprostředně po druhé světové válce došlo v Kanadě k nejvýznamnějším a nevídaným změnám v mechanizaci těžby dříví. Stovky inženýrů, lesníků, vývojářů a manažerů pracovaly na přechodu od ruční k mechanizované těžbě. Zásadní průlom v rozšíření motorových pil nastal kolem roku 1950, kdy se jejich hmotnost snížila natolik, že je mohl obsluhovat jeden pracovník (Drushka & Konttinen, 1997; Silversides, 1997; Sundberg, 1978). Ve východní Kanadě bylo v roce 1952 pouhých 20 % dříví těženo pomocí motorových pil, avšak do roku 1960 tento podíl vzrostl na téměř 100 % (Silversides, 1997). Podobný vývoj probíhal také v Evropě, kde byly ve Švédsku a Německu zřízeny továrny na výrobu motorových pil (Lidén, 1995). Již od 20. let 20. století se v Severní Americe experimentovalo s využitím traktorů pro transport pokácených stromů z lesa, zásadní pokrok však přineslo zavedení navijáků na traktory v roce 1925 (Brown, 1949; Silversides, 1997). V 50. letech byla v Sovětském svazu i v Severní Americe vyvinuta řada pásových vozidel pro přepravu dříví (Andersson, 2004). Rozsáhlá mechanizace těžby a odvozu dříví proběhla ve Skandinávii o něco později než v Severní Americe, i když již na počátku 30. let byly vyrobeny traktory určené pro odvoz dříví (Drushka & Konttinen, 1997). V roce 1957 byl představen první švédský speciálně navržený lesní traktor, který se začal vyrábět ve velkých sériích (Östberg, 1990). Významným pokrokem pro skandinávské lesnictví byl v roce 1959 příchod prvních hydraulických nakládacích kleští, které byly namontovány na traktory (Malmberg,

1988). Nejprve se používaly pouze stroje, které dokázaly stromy odvětvovat a řezat na jednotlivé výřezy a následně v roce 1972 vznikly stroje na kácení (Östberg, 1990). Harvestory, které stromy kácí, odvětvují a sortimentují, byly vynalezeny ve Švédsku a Finsku v letech 1972-73 (Drushka & Konttinen, 1997). V následujících desetiletích se systémy měření a automatizace u strojů pro zajištění sortimentní těžební metody postupně vyvíjely. Tyto těžké stroje se stávali postupně lehčími, rychlejšími a přesnějšími (Öhman et al., 2008). Do konce devadesátých let bylo v severských zemích stroji těženo přibližně 95 % dříví (Billingsley et al., 2008). Systémová transformace, která následovala po pádu komunistických režimů na začátku 90. let v evropských zemích tzv. „východního bloku“, ovlivnila prakticky všechny oblasti ekonomiky, včetně lesnictví (Sarvašová et al., 2015). Nejprve se jednalo o změnu vlastnictví, která začala navracením majetků zabavených komunistickým režimem tzv. pozemkovými restitucemi (Moskalik et al., 2017). První harvestory druhé generace byly přivezeny do Německa, Švýcarska a Rakouska, kde se, navzdory počáteční skepsi, rychle prosadily díky své produktivitě a šetrnosti v probírkách. V roce 1999 tvořily v Německu přibližně 25 % těžby. V České republice bylo hlavním důvodem pro rozvoj těchto těžebně-dopravních strojů jejich využití při odstraňování lesních porostů poškozených imisemi v Severočeských státních lesích v sedmdesátých letech minulého století (Dvořák, 2006; Schlaghamerský, 2001). Jejich využívání se však začalo nejvíce rozvíjet až po roce 2000. Například v roce 2002 bylo v ČR v provozu přibližně 60 harvestorů a roce 2005 se počet těchto strojů zvýšil na přibližně 140 a jejich podíl na těžbě dříví vzrostl na zhruba 11 % celkového objemu těžeb v ČR (Neruda et al., 2022).

Zásadní hnací silou mechanizace byla snaha o snížení nákladů, zrychlení výroby dříví, nedostatek pracovních sil a snížení rizika pro pracovníky v lese (Porter, 1985; Silversides, 1997; Sundberg, 1978). Inovace změnily těžbu na mnohem bezpečnější činnost s možností pracovat celoročně téměř bez omezení. Během éry využívání animální síly totiž byly pracovní operace převážně prováděny ve dne a měly výrazně sezónní charakter (Silversides, 1997). Vyhřívané kabiny a umělé osvětlení umožňují těžit v noci a za velkého chladu a deště. Navíc práce z kabiny stroje je bezpečnější než ruční kácení a krácení pouze s helmou na ochranu před padajícími větvemi nebo stromy. V roce 1990 se ve švédském lesnictví, přechodem na mechanizované prostředky oproti práci s motorovou pilou, snížila úrazovost o 73 %. Snížila se také výrazně zdravotní rizika spojená například s vibracemi motorových pil. Na druhé straně se postupnou mechanizací

výrazně zvýšila produktivita práce. Ve Švédsku se mezi lety 1960 a 1990 zvýšila produktivita práce jednoho pracovníka v lese z 2,3 na 12,5 m^3 na pracovní den. Rozsáhlá mechanizace vedla ve Švédsku k radikálnímu snížení počtu pracovníků v lesnictví, a to až o 90 % (Axelsson, 1998). Zároveň však vzrostla poptávka po pracovnících s vyšší kvalifikací schopných ovládat moderní stroje (Błuszkowska & Nurek, 2014). Proces mechanizace těžby postupuje skrze šest fází, kdy se přesouvá od zcela manuálního provozu s využitím animální síly k plně mechanizovanému a částečně automatizovanému provozu (Clough, 1965). Dalším logickým krokem v probíhajícím vývoji by byla automatizace a odstranění potřeby operátora (Hellström et al., 2009) a skutečně pokračují snahy vyvinout autonomní vozidla pro lesní těžbu (Hellström et al., 2008; Hellström & Ringdahl, 2009; La Hera et al., 2024; Mettin et al., 2009; Ringdahl et al., 2011, 2012). Výzkumné studie ukazují, že automatizace lesnických strojů je náročná kvůli složitosti lesního prostředí a dynamice strojů. Nicméně, částečná automatizace, která přebírá část ovládání stroje z rukou operátora, se ukazuje jako perspektivní způsob usnadnění práce (Lindroos et al., 2017; Morales et al., 2014; Nurminen et al., 2006; Oliveira et al., 2021; Visser & Obi, 2021).

V současné době je velmi diskutované téma přírodě blízkého způsobu hospodaření v lesích, ve kterém by lesní stroje měly zvládat provoz v náročném terénu, aniž by měnily nebo poškozovaly toto prostředí. Technický vývoj tak směřuje k vytváření strojů schopných pracovat v náročném, méně únosném a strmém terénu (Billingsley et al., 2008). Pravděpodobně nejčastějším požadavkem je minimalizace poškození půdy (Cambi et al., 2015). Přeprava takových nákladů, kdy samotná hmotnost přepravovaných kmenů dosahuje až 20 tun, je na lesní půdě náročná a musí se provádět tak, aby nedošlo k jejímu poškození. K tomu je ještě nutné započítat hmotnost samotného stroje. Ekonomická hlediska zase uplatňují požadavky na velké objemy soutřeďovaného dříví a vysoké rychlosti odvozu dříví z lesa (Lindroos et al., 2017).

3.3 Harvestorová technologie

Při výrobě surového dříví existuje několik metod a způsobů samotné těžby dříví (Moskalik et al., 2017), z nichž severský systém sortimentní metody, skládající se z harvestoru a vyvážecího traktoru, je považován v současnosti za celosvětově technologicky nejvyspělejší (Lindroos et al., 2017). Těžební operace lze v obecné rovině definovat jako součást výrobního systému, ve kterém se surový materiál přemění na

výrobky. V tomto výrobním procesu se pro výrobu dříví využívají stroje a pracovní síla, v souladu s definovanými pravidly. Nezbytné je splnit pracovní požadavky (normy) a přihlédnout k podmínkám prostředí. Výrobní systém musí být ziskový, jak na makroúrovni (lesnický průmysl), tak na mikroúrovni (lesnická firma). Jinými slovy by měly lesní operace probíhat způsobem, který je biodiverzitně efektivní, ekonomicky účinný, individuálně kompatibilní, ekologicky udržitelný a institucionálně přijatelný (Heinimann, 2007). Tyto indikátory jsou společné i pro jiné výrobní systémy jako je zemědělství nebo tovární výroba. Lesní těžba se ale odlišuje tím, že se práce provádí pouze venku, v náročném terénu a často i v odlehlých oblastech (Lindroos et al., 2017).

Vysoká efektivita těžby je jedním z předpokladů udržitelného lesnického provozu. Harvestory jsou vysoce efektivní stroje, které jsou navrženy na použití sortimentní metody, tedy operaci kácení a následně na další navazující operace (Borz et al., 2023). Produktivitu práce harvestoru ovlivňuje mnoho faktorů spojených s porostem (spon, objem stromů), terénem (sklon, stabilita, nerovnosti), strojem (typ, velikost, dosah ramene) a operátorem (zkušenosti, technika, postoj). Mnohé studie ukazují, že nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím produktivitu harvestoru jsou parametry těženého stromu, přičemž s rostoucími dimenzemi stromu roste i produktivita (Acuna & Kellogg, 2009; Ghaffariyan et al., 2012; Kellogg & Bettinger, 1994; Visser & Spinelli, 2012). Neruda a kol. (2015) udává, že malé kolové harvestory mají průměrnou výkonnost 4 m^3 vyrobeného dříví za hodinu, střední 10 m^3 za hodinu a velké 16 m^3 za hodinu. To představuje při jednosměnném provozu průměrnou roční výkonnost 7 800 m^3 až 31 200 m^3 vyrobeného dříví. Moderní harvestory jsou natolik efektivní, že spotřeba času na těžbu a manipulaci stromu nižšího objemu není přímo úměrná spotřebě času u stromu vyššího objemu (Nurminen et al., 2006). Dalším zásadním faktorem je výkon operátora. Variabilita produktivity mezi kvalifikovanými operátory může být přes 40 % (Hogg et al., 2011; Kärhä et al., 2004; Ovaskainen et al., 2004). Časová náročnost kácení, odvětvování i druhování závisí na objemu kmene. Celkové provedení výroby tak závisí na individuálních vlastnostech operátora: jeho odborných zkušenostech, věku, znalostech, dovednostech, schopnostech a individuálních typologických vlastnostech jeho osobnosti (Prinz et al., 2021). V podmínkách ČR byla realizována studie (Dvořák et al., 2019) , která sledovala mezi lety 2006 a 2017 náklady na výrobu dříví u dvou středněvýkonových harvestorů, které byly využívány ve výchovných těžbách. Průměrný objem kmene zpracovávaného harvestorem JD770D byl 0,11 m^3 bez kůry při roční výrobě dříví 16 793

m^3 bez kůry. Průměrné náklady na jeden m^3 vyrobeného dříví bez kůry se pohybovaly od 6,6 do 10,2 €. Druhý harvestor, typu JD1070D, zpracovával kmeny s průměrným objemem 0,29 m^3 bez kůry při roční výrobě dříví 26 837 m^3 bez kůry. Průměrné náklady na jeden m^3 vyrobeného dříví bez kůry u tohoto harvestoru dosáhovaly od 5,4 do 6,9 €. Nurminen a kol. (2006) studovali spotřebu času pro různé pracovní operace u harvestoru a ukázali průměrnou dobu pracovní fáze jako podíl na celkovém efektivním čase, přičemž kácení bylo 17 % a manipulace 45 % z celkového času při mýtní těžbě, 18 % a 27 % v probírkách. Další studie (Kärhä et al., 2019) uvádí průměrný podíl 61 % doby manipulace (vč. odvětvování, příčného řezu, měření) z celkové doby výroby dříví z jednoho kmene u kmenů smrku ztepilého. Javůrek a Dvořák (2018) se zaměřili v letech 2015-2016 na sběr časových snímků výroby dříví harvestory různých výkonnostních kategorií a v různých výrobních podmínkách po celé ČR. Zjistili průměrnou délku směny operátora harvestoru v délce 623 minut s operativním časem (čistý čas práce na výrobu dříví), který činil 73,6 % délky směny.

Harvestory jsou výkonné stroje s multifunkčními harvestorovými hlavicemi (Miettinen et al., 2010). Harvestor je složen z hnací jednotky, hydraulického jeřábu s průměrným dosahem 10 metrů a harvestorové hlavice, která má v sobě hydraulicky poháněné řezné ústrojí. Váha stroje se pohybuje do 23 tun a samotná váha harvestorové hlavice je 600–1000 kg (Knobloch et al., 2024; Sanktjohannser, 2019). Tyto hlavice zvládají řadu pracovních operací, a to kácení, odvětvování, měření tloušťky a délky, krácení na požadovanou délku, barevné označení sortimentů, ošetření pařezů, uložení vyrobeného sortimentu (Dooley et al., 2006; Kärhä et al., 2018).

Odvětvování je prováděno nárazem ostrých hran odvětvovacích nožů na větve (Hatton et al., 2017). Snímače napětí (potenciometry), ze kterých je následně stanovena tloušťka, jsou připojeny k ramenům podávacího válce nebo k odvětvovacím nožům. Stanovení tloušťky závisí na tom, jak široce se otevírají ramena podávacích válců. Délka stromu se obvykle měří pomocí měřicího kolečka, které je přitlačeno ke kmeni a posunováno. V průběhu výroby je kmen stromu pevně přitlačen proti měřicímu kolečku. Otáčení kolečka je zaznamenáváno optickým kodérem (Kalmari et al., 2011). Díky téměř rovnému tvaru kmenů jehličnanů, které se nejčastěji těží harvestorem, je technologie měření tloušťky a délky rychlá a plynulá (Hatton et al., 2017). Při každém příčném řezu kmene systém zaznamená sortiment, objem vyrobených sortimentů, objem celého kmene a další parametry výroby (Dooley et al., 2006). Neobchodovatelný vršek

stromu není měřen (Kiljunen, 2002). Přesnost měření ovlivňují klimatické podmínky, např. hroty měřicího kolečka pronikají hlouběji do nezmrzlého dřeva než do zmrzlého (Karaszewski et al., 2018). Tyto elektronické měřicí systémy mohou poskytovat mimořádně přesné výsledky, pokud jsou správně nainstalovány, nastaveny, je prováděno (pravidelně) průběžně kontrolní měření a v případě potřeby kalibrace (Dooley et al., 2006). Kalibrace harvestorové hlavice je velmi důležitá a značně ovlivňuje přesnost měření jak tloušťky, tak i délky a následné stanovení objemu. I po kalibraci existuje však mnoho odchylek v přesnosti harvestorové hlavice (Nieuwenhuis & Dooley, 2006).

3.4 Sortimentní těžební metoda

Celosvětově se ročně vytěží téměř dvě miliardy plnometrů průmyslové kulatiny (Lundbäck et al., 2021). Existují tři hlavní těžební metody, mezi které patří metoda kmenová, stromová a sortimentní (Kabeš, 2015). Dvě z nejběžnějších těžebních metod jsou metoda sortimentní a metoda kmenová (Lundbäck et al., 2021). Při sortimentní těžební metodě (v angličtině cut-to-length – CTL-method), někdy označované jako severská nebo skandinávská, se kmeny stromů krátí na jednotlivé výřezy (sortimenty) přímo na místě, kde probíhá těžba (Talbot et al., 2003). Stromy jsou tak pokáceny, odvětveny a kráceny (druhovány) na jednotlivé délky – sortimenty na jednom místě, v závislosti na druhu dřeviny, jakosti a požadovaných parametrech odběratele. Harvestor používá mechanické měření délky a tloušťky (Miettinen et al., 2010). V Kanadě je tato metoda označovaná jako „řezání na délku u pařezu“, což ji přesně definuje (Lundbäck et al., 2021). Tato metoda obvykle využívá dva stroje, tj. harvestor a vyvážecí traktor, které jsou společně označovány jako harvestorový uzel. Testovány byly také kombinované stroje (harwardery), které jsou schopny provádět jak samotnou těžbu a manipulaci, tak následnou dopravu vyrobeného dříví (sortimentů) na odvozní místo (Tufts, 1997). Harvestor v lese provádí výrobu dříví systémem pásových linek, které mají od sebe vzdálenost zhruba 20 m, aby mohl dosáhnout na všechny stromy k transportní hranici pracovního pole svým 10 m dlouhým hydraulickým jeřábem (Knobloch et al., 2024). Vyvážecí traktor nebo vyvážecí souprava následně vyveze vyrobené sortimenty z vývozního místa na odvozní místo (Strubergs et al., 2020). Ve srovnání s jinými plně mechanizovanými metodami výroby dříví je těžební metoda sortimentní obecně považována za ekologičtější, všestrannější a bezpečnější metodu, která poskytuje konečné sortimenty konzistentnější a vyšší kvality než mechanizované metody stromové a kmenové (Tufts, 1997).

Využití sortimentní těžební metody realizované harvestory se mezi evropskými zeměmi liší. Nejvyšší podíl těžby touto technologií je v severní, západní a střední Evropě, naopak nejmenší v jižní a jihovýchodní Evropě (Mederski, Karaszewski, et al., 2016; Moskalik et al., 2017). Ve skandinávském lesnictví je sortimentní metoda využívána téměř výhradně ke všem těžbám (Söderberg et al., 2021). Významně je také využívána například v Estonsku, kde tvoří 80 % z celkové roční těžby, Litvě (70 %), Německu (65 %) nebo Španělsku a Itálii (60 %) (Lundbäck et al., 2021). Stoupající trend využití sortimentní metody na celkové roční těžbě je sledován také v Polsku (Bembenek et al., 2015). Nižší zastoupení sortimentní metody v jihovýchodní Evropě je způsobeno nároky na vysoké investiční náklady při pořizování harvestorové technologie (Dvořák et al., 2019). Dalším důvodem této rozdílnosti ve využití sortimentní metody je druhové složení dřevin – jehličnaté dřeviny jsou pro využití sortimentní metody vhodnější (podrobněji v kapitole 3. 6.) a převažují zejména v severní, západní a střední Evropě (Mederski, Bembenek, et al., 2016; Mederski, Karaszewski, et al., 2016). Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) a smrk ztepilý (*Picea abies*) jsou však jehličnany, které jsou považovány za méně odolné vzhledem k měnícím se klimatickým podmínkám a očekává se, že jejich zastoupení ve středoevropských nížinných lesích se s globálními změnami výrazně sníží (Buras & Menzel, 2019). Lesní ekosystémy se stávají nestabilními (Dale et al., 2001), jsou vystaveny měnícímu se klimatu, které s sebou nese častější a silnější větrné bouře a období sucha (Gregow et al., 2017; Hogan et al., 2018; Rodriguez-Vallejo & Navarro-Cerrillo, 2019). Zimy jsou stále teplejší, což vytváří ideální podmínky pro kůrovce a další patogeny, které tak mohou snadněji napadat a poškozovat stromy (Lindner et al., 2010; Williams & Liebhold, 2002). Kvůli zvyšující se nestabilitě lesů jsou preferovány smíšené porosty před monokulturami (Peltola et al., 2000). Listnaté dřeviny budou pro měnící se podmínky vhodnější, a tak buk evropský a dub letní (*Quercus robur* L.) budou stále více dominovat ve velké části střední Evropy (Buras & Menzel, 2019). V provozním kontextu však více druhů stromů zaanamená vyšší počet sortimentů, což komplikuje druhování kmenů, a právě využití harvestoru v těžbě (Kemmerer & Labelle, 2021). V evropském měřítku je nejvíce zalesněnou oblastí severní Evropa (54 % rozlohy zalesněno), která má také největší podíl jehličnatých druhů stromů a nejmenší podíl listnatých. Nicméně nejvyšší zásobu dřeva má středovýchodní Evropa (Mederski et al., 2022). Větší podíl mechanizované těžby je ve Švédsku a Finsku než v pobaltských zemích (Moskalik et al., 2017). Ve střední a východní Evropě je 27,3 % rozlohy půdy pokryto lesy (SEF, 2020).

3.5 Potenciál využití harvestorů v ČR

V Česku se podíl dříví vyráběného harvestory v posledním desetiletí zvyšoval a v roce 2022 dosáhl 45 % (MZe, 2023). Maximálního využití bylo dosaženo v roce 2021 ve výši 51 % (MZe, 2022). Studie provedená Pucherem a kol. (2023), která zahrnovala 34 evropských zemí včetně České republiky, uvedla, že všech 34 zemí vykazuje rostoucí zásobu dříví v lesích. Studie kombinovala údaje o lesním porostu (druhy dřevin, typu půdy), terénu (sklon) a lesních cestách k identifikaci lesních porostů přístupných současnými mechanizovanými těžebními prostředky. Všechny lesy v této studii pokrývaly rozlohu 183 miliónů ha, z nichž 74,9 % bylo označeno jako ’forest available for wood supply’, neboli ’les vhodný pro zásobování dřevem’. V České republice je to dle studie 96,1 % plochy lesů. Dále bylo stanoveno, že míra mechanizace je v ČR stále relativně nízká. Kombinace harvestoru a vyvážecího traktoru je však vhodná pro 2/3 ’lesů vhodných pro zásobování dřevem’ (Pucher et al., 2023). Toto potvrzuje i výzkumná studie (Dvořák & Natov, 2016).

Použití harvestoru závisí také na sklonitosti terénu, únosnosti půdy a terénních překážkách (Stampfer, 1999). Strandgard a kol. (2014) uvádějí, že sklon terénu je hlavním faktorem ovlivňujícím produktivitu práce lesních těžebních strojů a plánování jejich nasazení ve svazích je důležité pro průběh celé těžby. Pro kolové harvestory je vhodný maximální sklon po spádnici (podélný sklon) do 35 % a ve výjimečných případech až 50 %, v závislosti na stavu pojezdového povrchu (Stampfer, 1999). Nad 50 % lze vyžít pásové, kombinované a kráčející typy podvozků (Molnár, 2004). Například na Novém Zélandu schválený kodex pro bezpečnost a ochranu zdraví při lesním provozu udává, že lesní stroje na svazích by neměly překročit 40 % (22°) u pásových strojů a 30 % (17°) u kolových strojů, pokud nejsou stanoveny jiné limity výrobcem stroje (Ministry of Business Innovation &Employment, 2012). Dle Stampfera a Steinmüllera (2001) jsou kolové harvestory omezeny na méně strmé svahy. Za příznivých půdních podmínek mohou pásové harvestory se samonivelačními kabinami pracovat na svazích až do 60 % (31°), zatímco specializované harvestory na strmý terén, jako je Komatsu 911.3 X3M, nebo harvestory upoutané na lano navijáku, zvládnou svahy až do 70 % (35°). V praxi jsou však limity sklonu pro harvestory obvykle nastaveny níže, aby byla zajištěna bezpečnost a minimalizovalo se poškození půdy (MacDonald, 1999; Sutherland, 2012).

Na strmějších svazích lze stabilitu harvestoru zajišťovat pomocí trakčního navijáku. Moderní konstrukce harvestorů umožňují u mnoha typů strojů vyrovnání kabiny řidiče do vodorovné polohy i na strmých svazích. Kola podvozku se rovněž mohou přizpůsobit sklonu terénu. Běžné překážky v porostu, jako jsou balvany, kořeny nebo prohlubně, tak tyto stroje překonávají bez problémů (Dvořák et al., 2012). Významnými technickými parametry, které charakterizují průjezdnost harvestoru terénem, jsou světlá výška podvozku a úhel nájezdu. U harvestorů se světlá výška podvozku obvykle pohybuje od cca 40 cm do 70 cm. Na úhel nájezdu stroje má kromě konstrukčního řešení přední části rámu podstatný vliv také typ nápravy a velikost kol v přední části rámu stroje pod kabinou. Překážky v terénu lépe překonávají tandemové (tzv. bogie) nápravy, proto je úhel nájezdu ve srovnání s pevnými nápravami vyšší u tandemových náprav (Neruda et al., 2022). Obecně se za překážky v terénu považují objekty a terénní nerovnosti s výškou nad 50 cm. Pokud jsou však od sebe vzdálené více jak 5 m, nepovažují se za terénní překážky (Zlatuška et al., 2020).

Další studie uvádějí, že limit sklonu terénu pro pozemní způsob těžby se liší podle únosnosti půdy (Heinimann, 2000) a může se pohybovat mezi 30 % až 40 %, aby se zabránilo nadměrnému poškození půdy (Visser & Stampfer, 2015). Zhutňování půdy a přemísťování jsou významnými následky provádění lesních činností (Hartmann et al., 2014; Labelle et al., 2015). Mezi hlavní poškození lesní půdy a lesního porostu způsobená těžbou a soustřeďováním dříví patří narušení povrchu půdy, změny ve fyzikálních, chemických a biologických vlastnostech, a také poškození přirozené obnovy a zbytkového porostu (Naghdi et al., 2011). Ke zhutnění půdy dochází v důsledku zatížení, vibrací a tlaku ze strojů, které se používají při těžbě (Adams & Froehlich, 1981). Zhutnění půdy lze charakterizovat jako rozpad povrchových agregátů, což vede ke zvýšení objemové hmotnosti a odolnosti půdy vůči penetraci (Adams & Froehlich, 1981; Gomez et al., 2002). Snížení makroporozity půdy může bránit pronikání kořenů, infiltraci vody a výměně plynů a živin (Quesnel & Curran, 2000) a tyto změny mohou vést ke snížení regenerace a růstu stromů (Han et al., 2009).

Významným faktorem pro samotné rozhodnutí o nasazení harvestorové technologie je únosnost terénu. Zlatuška a kol. (2020) sestavil klasifikaci technických parametrů jednotlivých skupin těžebně-dopravních strojů, která odpovídá současnému stupni poznání a využívaným technologiím. Daná klasifikace určuje technologie akceptovatelné z hlediska požadavků minimalizace poškozování lesních ekosystémů.

Tato klasifikace doporučuje nasazení harvestorové technologie na únosných a podmíněně únosných půdách do 100 kPa. Únosné podloží je charakterizováno odoláváním měrnému tlaku ve stopě 200 kPa (hloubka koleje do 5 cm při jednorázovém pojezdu) a to i při změnách vlhkosti půdy. Únosnost podmíněná je charakterizována proměnlivou únosností půdy v rozmezí 50 až 200 kPa v závislosti na změnách podmínek. Celoroční plánování těžební činnosti a přechod na nasazování lesní techniky do lesních porostů v průběhu celého roku značně zvýšily rozsah možných negativních důsledků této hospodářské činnosti, pokud není akceptována u řady typů půdy sezónní únosnost půdního podkladu. Na podmíněně únosných půdách je proto nasazení harvestorové technologie možné jen za sucha či za mrazu (Zlatuška et al., 2020).

3.6 Dřeviny vhodné pro výrobu surového dříví harvestory

V České republice je aktuálně 68 % jehličnatých dřevin, z toho 46,8 % smrku, 16 % borovice, 3,9 % modřínu, 1,3 % jedle a 0,4 % ostatních jehličnatých dřevin. Z listnatých dřevin zastoupených 29,5 % je nejvíce buku (9,6 %) a dubu (7,8 %). Celková plocha jehličnatých lesů se nadále zmenšuje, zatímco podíl listnatých lesů se stále, i když pozvolna, zvyšuje (v roce 2022 o 0,8 %). Postupně klesá podíl smrku a částečně i borovice, zatímco podíl buku a dubu naopak roste (MZe, 2023).

Harvestory jsou stroje konstruované pro těžbu jehličnatých dřevin, ale od začátku 90. let bylo několik snah o těžbu listnatých stromů harvestory (Bigot & Cuchet, 2003). Vzhledem k tomu, že harvestorové hlavice jsou konstruovány ve Skandinávii a optimalizovány pro jehličnaté stromy, jejich využití v listnatých a smíšených porostech, které se často vyskytují ve střední Evropě, je omezené. Harvestory se pro těžbu listnatých dřevin nehodí z důvodu velkého rozvětvování kmene, tlusté oddenkové části stromu, větších nepřesností při měření délky, silných větví a vysoké hustotě dřeva (Mederski et al., 2022). I přes to, že byly kvůli větrné kalamitě ve Francii v roce 1999 velké snahy o těžbu listnatých stromů harvestory, byla zjištěna podstatně menší produktivita a častější opravy hlavic (Bigot & Cuchet, 2003). Studie však ukázaly, že listnaté stromy v mladších porostech s tenčími větvemi by mohly být efektivně zpracovány harvestory (Mederski et al., 2019). Pro kácení listnatých stromů větších dimenzí je proto prozatím jedinou možností manuální těžba motorovou pilou (Labelle et al., 2018). U všech dřevin výrobu surového dříví harvestorovou technologií komplikuje rozdvojení kmene. Z tohoto hlediska nejsou pro harvestory výhodné porosty s vyšším zastoupením rozdvojených

a křivých stromů (Neruda et al., 2022). S pokračujícím vývojem těžební techniky jsou dnes v praxi k dispozici harvestory se šířkou stroje pod 1,8 m, tj. jsou využitelné i při výchovných těžbách v mladých lesních porostech. Mezi výhody jejich nasazení patří vysoká produktivita, bezpečnost práce a při kvalitně proškolené obsluze i minimální škody na ponechaných stromech (Novák et al., 2019). Vzhledem ke klimatickým změnám a úbytku pracovních sil v lesích se zdá, že mechanizovaná těžba listnatých porostů je chybějícím článkem mezi intenzivnějším a efektivnějším využíváním lesů. S ohledem na soustavný pokles zájmu o manuální práci lze očekávat rostoucí zájem o využití harvestoru k těžbě i u listnatých dřevin. Během posledních 15 let došlo k několika větším iniciativám vedoucím k návrhu a vývoji hlavic harvestorů pro listnaté druhy, s účastí institucí a univerzit z Francie, Německa a Polska. Vzhledem k současnému trendu a rostoucímu tlaku na získávání řeziva z listnatých dřevin ekonomicky efektivním, bezpečným a šetrným způsobem, lze očekávat, že vývoj v tomto směru bude pokračovat (Mederski et al., 2022).

Následující část práce zmiňuje konkrétní tři druhy jehličnatých dřevin (smrk ztepilý, borovici lesní a modřín opadavý), které jsou vhodné pro výrobu dříví harvestorovou technologií a byla jim věnována pozornost při sběru dat a vyhodnocení výsledků v článcích publikovaných v rámci této disertační práce.

3.6.1 Smrk ztepilý

Smrk ztepilý (*Picea abies*) je jednou z nejvýznamnějších dřevin Evropy jak z ekonomického, tak ekologického hlediska (San-Miguel-Ayanz et al., 2016). Dřevo smrku ztepilého je vysoce ceněno pro svou kvalitu a univerzálnost. Tento jehličnan se vyznačuje přímým, úzce kuželovitým kmenem a pravidelným přeslenitým větvením. Dosahuje výšky až 50 metrů a objem dřevní suroviny může přesahovat i 30 m³. Smrk ztepilý se dožívá věku 350-400 let (Úradníček et al., 2001). Tento strom je důležitou součástí českých lesů, kde tvoří 46,8 % všech lesních porostů (MZe, 2023).

Smrk ztepilý preferuje chladnější a vlhčí klimatické podmínky, typické pro horské a podhorské oblasti. Jeho vysoké nároky na dostatek vody a mělký kořenový systém vedou k nízké odolnosti vůči extrémním přírodním vlivům, jako jsou nárazové větry, silné mrazy, nápor sněhu a letní sucho, což snižuje jeho schopnost bránit se škůdcům (Úradníček et al., 2001). V České republice je však často vysazován i v nižších polohách, což vede k problémům s jeho zdravotním stavem a odolností vůči škůdcům, zejména

lýkožroutu smrkovému (*Ips typographus*). Z pohledu těžby dříví harvestorovou technologií je považován za velmi vhodnou dřevinu. I když jeho podíl v českých lesích mírně klesá a do budoucna tento trend zřejmě potrvá, stále bude významnou hospodářskou dřevinou. Harvestorovou technologii lze efektivně využít i ve výchovných zásazích u mladých smrkových porostů. Modely výchovy smrkových porostů pro harvestorové technologie jsou pro růstové podmínky ČR přehledně uvedeny například v certifikované metodice Nováka a kol. (2019).

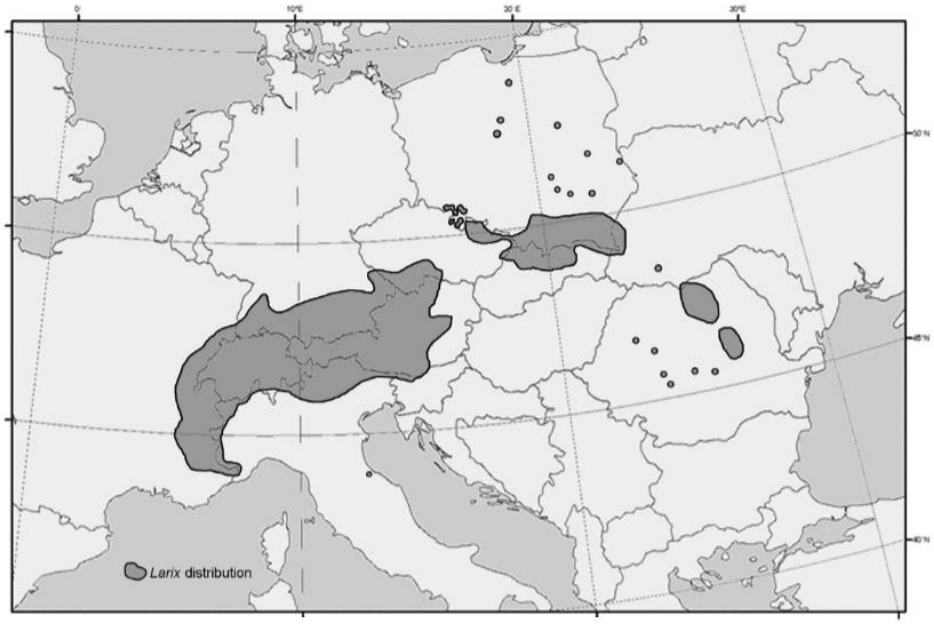
3.6.2 Borovice lesní

Borovice lesní (*Pinus sylvestris*) je jednou z komerčně nejvýznamnějších dřevin v Evropě (Roszyk et al., 2020). Borovice je druh pocházející z Eurasie, který se vyskytuje v lesích od západní Evropy po východní Sibiř a od severní Skandinávie po hory jižní Evropy. Často se vyskytuje na chudých písčitých a kamenitých půdách nebo rašeliništích, na úrodnějších půdách jí obvykle konkurují jiné druhy. Tento jehličnan může dosahovat výšky 35 m (v dobrých polohách i 40 m) a přibližně tloušťky 50 až 130 cm (Gardner, 2013; Mason & Alía, 2000; Xenakis et al., 2012). Jako pionýrský druh je borovice schopna růstu na chudých půdách, a tak je vysazována jako protierozní opatření, meliorační dřevina a jako větrolam. Využívá se také k výrobě bioenergie. Nejdůležitější však je, že borovice lesní se běžně používala pro výrobu buničiny a jako řezivo. Její snadno zpracovatelné dřevo, je jedním z nejpevnějších mezi měkkými dřevy a běžně se používá v nábytkářském a stavebním průmyslu (Auty et al., 2014; Cao et al., 2015; Gardner, 2013; Routa et al., 2011).

Borovice lesní je jedním z významných jehličnanů v lesích České republiky. Podle posledních údajů Ministerstva zemědělství (MZe) z roku 2022 borovice lesní tvoří přibližně 16 % z celkové dřevinné skladby českých lesů a je druhým nejzastoupenějším jehličnanem po smrku. U starších borovic jsou však v korunách tlusté větve a dochází k problémům při protahování kmene odvětvovacími noži. Proto jsou v tomto případě vhodné harvestorové hlavice se 4 protahovacími válci s kratším rámem, který se lépe přizpůsobí tvaru kmene (Neruda et al., 2022). Harvestorovou technologii lze efektivně využít i ve výchovných zásazích u mladých borových porostů. Modely výchovy borových porostů pro harvestorové technologie jsou pro růstové podmínky ČR přehledně uvedeny například v certifikované metodice Nováka a kol. (2019).

3.6.3 Modřín opadavý

Modřín opadavý (*Larix decidua* Mill.), jehličnatý strom, který je v okolních zemích rozšířen v jihovýchodní Francii, Švýcarsku, severní Itálii, jižním Německu, Rakousku, České republice, Slovensku, Polsku, Ukrajině a Rumunsku (obrázek 1), v různých nadmořských výškách, mezi 600 a 2500 m n. m. Obecně je jeho rozšíření omezeno na malé oblasti, největší v Alpách (Fărcaș et al., 2013).



Obrázek 1: Mapa rozšíření modřínu opadavého v Evropě

zdroj: Euforgen, 2009

Modřín má vysokou odolnost vůči chladu, toleranci vůči teplu a rychlý růst v mládí. Modřín tak lze po odlesnění pěstovat na otevřených plochách. Jeho odolné zakořenění a na zimu opadávající jehlice mu předurčují vyšší odolnost proti působení větru a rozvratu sněhem, než je tomu u smrku a borovice (Fărcaș et al., 2013).

Modřín opadavý patří ke dřevinám s nižším zastoupením v českých lesích. Podle údajů za rok 2022 (MZe, 2023) představuje 3,9 % dřevinné skladby českých lesů. Je tak třetím nejzastoupenějším jehličnanem po smrku a borovici. Současné studie ukázaly, že jde o geograficky původní dřevinu na území Česka (Pokorný et al., 2024). V minulosti však nebyl v českých lesích nikdy výrazněji zastoupen. Důvodem byly i jeho ekologické nároky, kdy jej lze považovat za světlomilnou dřevinu (Bottero et al., 2013), tedy v hustých listnatých porostech konkurenceschopně slabou. V současnosti není důvod tuto dřevinu v hospodářských lesích nevyužívat. Modřín se používá především pro pěstování

smíšených porostů ve formě jednotlivých a skupinových směsí. Pomáhá lesníkům zvyšovat druhovou rozmanitost lesů, v roce 2022 jej využili při umělé obnově lesů po kůrovcové kalamitě na celkové ploše téměř 2000 hektarů, což představovalo 5 % z celkové roční uměle zalesněné plochy (MZe, 2023). Podle doporučené dřevinné skladby (MZe, 2023) by se zastoupení modřínu v českých lesích mělo v budoucnu zvýšit na 4,2 %. Modřín je strom vhodný pro těžbu a zpracování harvestory. A protože modřín tvoří často příměs smrkových a borových porostů, lze předpokládat, že modřínové dříví se bude pravděpodobně vyskytovat ve vyšších objemech než dnes ve výrobě harvestorovou technologií.

3.7 StanForD

Vývoj informačních technologií a jejich praktických aplikací ovlivnil i těžebně-dopravní stroje. Tento vývoj začal již v osmdesátých letech, kdy Robert Bosch GmbH vyvinul a začal zavádět systémy do řízení strojů, které automaticky zaznamenávaly určité parametry při provádění práce bez přímé účasti člověka (Peltola el al., 2003). V polovině osmdesátých let byl speciálně pro lesní stroje vyvinut komunikační datový standard „Standard for Forest Machine Data and Communication“ (StanForD), který shromažďoval data z výroby a provozu strojů a mnoho dalších informací důležitých pro analýzu těchto strojů a lidské práce (Palander et al., 2013).

S postupem času se původní verze standardu StanForD stala zastaralou, mnoho proměnných ztratilo svůj význam a vyvstala potřeba dalších obsahových dat. V roce 2010 byl dokončen a zaveden nový standard StanForD 2010 a původní verze byla přejmenována na StanForD Classic (Arlinger & Möller, 2010; Skogforsk, 2012a). Nový standard funguje v otevřeném formátu XML a k otevření souboru není potřeba žádný specifický software (Aigars, 2020). V České republice většina harvestorů v roce 2024 stále používá StanForD Classic, který umožňuje zaznamenávat data ve více než 20 standardních typech souborů. Jedná se např. *.KTR soubor pro kontrolní naměřená data, *.PRD soubor pro výrobní data, *.STM soubor pro podrobné informace o kmeni, *.APT soubor pro zadávání výroby vč. druhování dříví atd. StanForD nabízí výběr ze 14 různých typů cen důležitých pro stanovení objemu dříví (Skogforsk, 2012b). Typy cen specifikují algoritmus pro stanovení objemu na základě naměřených údajů (tlouštěk a délek) a také určují, zda je pro zařazení výřezů do jednotlivých sortimentů použita středová nebo čepová tloušťka (Natov & Dvořák, 2018).

Shromážděná data skýtají velký potenciál pro zlepšování lesnických provozů a dodavatelského řetězce dřeva zejména v době, kdy se prostředí (příroda, společnost) rychle mění (Kemmerer & Labelle, 2021). S postupujícím trendem lesnického průmyslu směrem k automatizaci strojů a optimalizaci výrobního řízení se zvyšuje zájem o sběr dat přímo z lesního prostředí (Jutila et al., 2007).

3.8 Zjišťování objemu výroby z prvotní evidence harvestorů

Při výrobě surového dříví je nejprve strom pokácen pomocí harvestorové hlavice. Poté je kmen průběžně odvětvován a krácen na sortimenty. V hlavici harvestoru je zabudováno měřicí zařízení, které během kácení a manipulace měří délku a tloušťku kmene a optimalizuje tím výrobu výřezů. Veškeré naměřené údaje jsou pak odesílány a ukládány do počítače stroje (Dvořák et al., 2012; Lukáč, 2005; Söderberg et al., 2021; Ulrich et al., 2002). V harvestorech jsou uloženy datové soubory, které poskytují podrobné informace o délce, tloušťce, druhu dřeviny a sortimentu dříví (Rasinmäki & Melkas, 2005; Söderberg et al., 2021). Počítač využívá k stanovení objemu změřenou délku a tloušťku. Objem se počítá pro každý jednotlivý výřez, ale data lze také akumulovat a následně zobrazit objem pro celý vytěžený kmen nebo porost (Söderberg et al., 2021).

Celková délka výřezu, tedy nejkratší vzdálenost mezi čelem a čepem, je udávána s přesností na 1 cm. Pro téměř všechny výřezy jehličnatého i listnatého dříví je stanoven přídavek k délce (nadměrek) ve výši 2 % jmenovité délky (vyjma např. vlákniny), který se však do jmenovité délky nezapočítává (Neruda et al., 2022). Délka zobrazená na počítači stroje je uvedena s přesností +/- 2 cm plus velikost řezacího okna, které obvykle činí 3–4 cm. Řezací okno je délkově ohraničená část kmene (interval), ve které je povoleno jeho zkrácení nad rámec součtu jmenovité délky a nadměrku (Fišer & Provazník, 2012).

Měření tlouštěk probíhá současně s měřením délek (Lukáč, 2005). S otáčením měřícího kolečka dochází k načítání impulsů, které jsou přenášeny do počítače a přepočítávány na délku. Odvětvovací nože, resp. potenciometry, umístěné v jejich paždí, snímají napětí, které počítač převádí na reálné hodnoty tloušťky, jež se zobrazují na obrazovce. Tloušťka je tedy určena na základě rozevření odvětvovacích nožů (Dvořák et al., 2012). Některé typy harvestorů mají senzor umístěn přímo na podávacích válcích. Tloušťka kmene je měřena každý jeden centimetr, ale vyhodnocuje se v intervalech po

10 centimetrech (Andersson & Dyson, 2002; Makkonen, 2001). Střední tloušťka se tak vypočítá jako průměr všech naměřených hodnot na jednom výřezu. Tento výsledný údaj se používá k určení tloušťky tenčí části výřezu (čepu), který pak slouží k třídění výřezů do požadovaných sortimentů (Lukáč, 2005).

Při výrobě není možné protáhnout celý kmen hlavicí harvestoru najednou. Proto počítač využívá predikci tzn. postupný návrh vyráběných sortimentů, při které se spodní část kmene změří a na základě těchto údajů se pro zbytek kmene vypočítá jeho pravděpodobný tvar a navrhne výroba požadovaných sortimentů (Ulrich et al., 2002).

Celkový objem výřezu stanovuje výrobně-evidenční software harvestoru dle změřené délky a tloušťky. Tento objem je stanoven pomocí algoritmu, který je předem vybrán ve výrobně-evidenčním softwaru stroje (Neruda et al., 2015). Standard StanForD nabízí různé typy cen (tzv. price categories), které určují jak algoritmus pro stanovení objemu výřezu, tak způsob druhování výřezu podle jeho středové nebo čepové tloušťky (Skogforsk, 2012a). Důležitým parametrem pro stanovení objemu je také určení, z jaké délky (celkové, jmenovité) bude objem počítán (Wojnar, 2007). Harvestor stanovuje objem na základě předem nastaveného výpočtového vzorce tzv. typů cen. V následující tabulce č. 1 jsou uvedeny metody stanovení (výpočtu) objemu podle jednotlivých typů cen.

Tabulka 1: Typy cen, které používá StanForD pro výpočet objemu a jejich popis

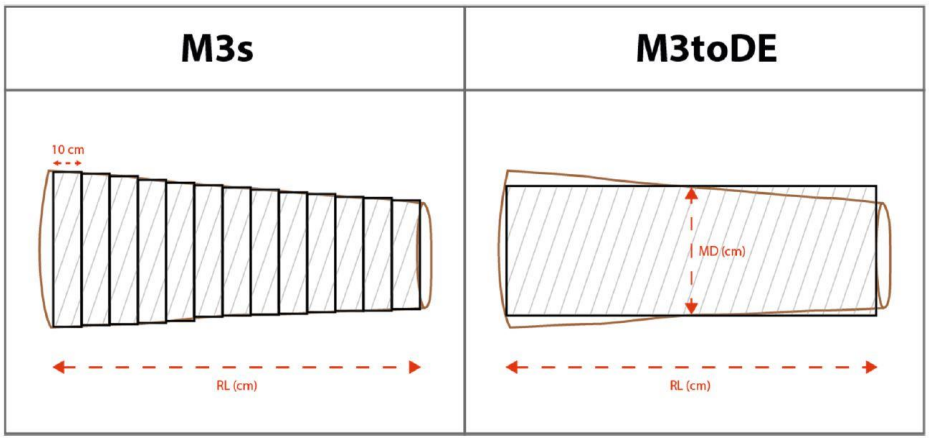
Typ ceny	**Popis typu ceny**
M3to	Cena za metr krychlový. Objem dle tloušťky v nejmenším průměru výřezu (čepu).
M3s	Cena za metr krychlový. Celkový objem po sekcích. Objem se vypočítá jako skutečný objem výřezu (obvykle je objem dělen). To znamená, že výřez je nejprve rozdělen do sekcí, např. 10 cm. V každé sekci je změřena střední tloušťka. Celkový objem se pak uvádí jako součet objemů všech sekcí.
Log	Cena za výřez. Objem se stanovuje jako M3s (předchozí metoda) při registraci výsledku výroby.
M3sNO	Cena za metr krychlový. Norský typ ceny. Objem se vypočítává na základě válce s teoretickým průměrem na středu výřezu (M). Délka (L) je celková skutečná délka v decimetrech. Je-li L v centimetrech, je zkrácena na decimetry (spodní třída). Podle definice je průměrná třída u tloušťky 1 cm (nezávisle na skutečných cenách v cenové matici). Registrovaná tloušťka (T) se měří 10 cm od vrcholu. Jestliže je T v milimetrech, je zaokrouhlena na centimetry (spodní třída). Pro získání tloušťky ve středu kmene (M) se použije vzorec: $M = T + (L/2 * 0,1) + 0,5$ Objem se následně vypočítá v dm^3 podle vzorce $V = ((M/10)*(M/10)*\pi/4*L$

M3tobutt	Cena za metr krychlový. Švédský typ měření tloušťky čela a čepu. Měření tloušťky výřezu s nebo bez kůry ve vzdálenosti 10 cm od čepu a ve vzdálenosti 10 cm od čela výřezu. U oddenkového výřezu ale ve vzdálenosti 50 cm od čela výřezu. Objem výřezu se vypočítává z průměrné hodnoty délky a průměru třídy. Je-li tloušťka výřezu zaznamenána v mm nebo délka v cm, objem může být vypočítán jako dolů zaokrouhlená hodnota tloušťky nebo délky. Měřením čela a čepu výřezu se objem vypočítá podle následujícího vzorce: V = PI/4*L/100*[a*(Dr/1000) ^ 2+(1-a)*(Dt/1000)^2]. V je objem výřezu v m^3, L je délka výřezu v cm, Dr je tloušťka čela výřezu v mm a Dt je tloušťka čepu výřezu v mm.
M3toDE	Cena za metr krychlový. Německý typ ceny. Objem je založen na naměřené středové tloušťce a cenová matice je založena na čepové tloušťce. Středová tloušťka je zaokrouhlena na nejbližší cm dolů tzv. HKS metoda.
M3miDE	Cena za metr krychlový. Objem je založen na naměřené středové tloušťce a cenová klasifikace je založena na středové tloušťce. Tloušťka je zaokrouhlena na nejbližší cm dolů tzv. HKS metoda.
M3smimi	Cena za metr krychlový. Výpočet objemu je založen na středové tloušťce (mm), který je ve skutečné (celkové) délce. Stejně tak jako cenová matice je dle středové tloušťky (mm).
Board feet	Cena za board feet. Americký typ ceny. Není normativně definován. Je použitelná celá řada různých metod výpočtu.
M3sm	Cena za metr krychlový. Měřena středová tloušťka (mm) pro výpočet objemu. Cenová matice je založena na tloušťce čepu (mm).
LogNO	Cena za kmen. Norský typ ceny. Objem se měří podle kódu M3sNO při registraci výsledku výroby.
M3sB	Cena za objem svazku. Hromadný objem vypočtený s výchozím průměrem a délkou svazku.
M3sEST	Estonská funkce pro výpočet objemu/ Nilsonův model. Výpočet skutečného objemu na základě čepové tloušťky výřezu. Objem je počítán následovně: V=(D*D*L(a1+a2*L)+a3*L*L)/10000 V=objem výřezu m^3 bez kůry, D= čepová tloušťka v mm, L=délka výřezu v dm s alespoň jedním desetinným místem, a1, a2 a a3=kuželové koeficienty závislé na druhu dřevin, které jsou uloženy v prom161_t2, prom161_t3 a prom161_t4.
M3tos	Cena za metr krychlový. Objem dle tloušťky čepu (SED) podle typu ceny 1 při registraci výsledku výroby. Proměnná 164 definuje přesné místo, kde se měří čepová tloušťka SED. Cenová matice dle skutečného objemu M3s, jak je definováno v souladu s typem ceny 2.

Zdroj: Skogforsk, 2012a; Natov & Dvořák, 2018

Tři z těchto typů cen jsou relevantní pro použití v českém lesnictví - M3s, M3toDE a M3miDE. První, typ ceny M3s, představuje stanovení objemu, který je nejbližší skutečnému objemu (Skogforsk, 2012a). Tento typ ceny je založen na stanovení dílčích objemů 10 cm dlouhých úseků kmene, které se následně sečtou (princip Newtonovy metody). Celkový objem kmene je tedy vždy součtem objemů všech jeho úseků. Další dva typy cen, M3toDE a M3miDE, využívají algoritmus pro stanovení objemu založený na Huberově vzorci (Husch et al., 2003) a metodě Handelsklassensortierung

(HKS, třídění obchodovatelného dříví) (BW-HKS, 1983). Princip stanovení objemu podle typů cen M3s a M3toDE je graficky znázorněn na obrázku č. 2.



Obrázek 2: Princip stanovení objemu dříví podle typů cen M3s a M3toDE. Objem stanovený pomocí typu ceny M3s vychází ze stanovení dílčích objemů 10 cm dlouhých úseků (segmentů), které se následně sečtou. Naproti tomu typ ceny M3toDE stanovuje objem na základě středové tloušťky (MD) kmene zaokrouhleného dolů na nejbližší celý centimetr. Oba typy cen vyjadřují objem výřezu pomocí jeho jmenovité délky (RL).

3.9 Kontrolní měření a kalibrace

Harvestory jsou vybaveny počítačovými měřicími systémy, které během odvětvování měří kmen (Nieuwenhuis & Dooley, 2006). Z každého pokáceného stromu lze získat vyšší ekonomickou hodnotu, pokud jsou měření kmene provedená harvestorem přesná. Díky přesným měřením kmene může palubní počítač harvestoru pomoci operátorovi optimalizovat krácení tak, aby z každého stromu získal co nejvyšší ekonomický efekt. Hodnotové ztráty způsobené nepřesnostmi při měření harvestoru se mohou pohybovat v rozmezí 3 až 23 %. Nejčastějším problémem jsou nepřesnosti v měření tloušťky a délky výřezů (Marshall, Murphy, & Boston, 2006). Efektivní fungování měřicích systémů závisí na pravidelné a důsledné kalibraci a na údržbě měřících zařízení (Nieuwenhuis & Dooley, 2006). Operátor harvestoru by měl pravidelně ověřovat přesnost měřicích systémů prostřednictvím kontrolních měření (Schlaghamerský, 2001). Kontrola měření délky a průměru harvestoru by se měla provádět alespoň jednou denně (Neruda et al., 2022). Kalibraci není třeba provádět, pokud výsledky kontrolního měření zůstávají v mezích doporučené tolerance (Natov & Dvořák, 2018). Tolerance výsledku kontrolního měření se mírně liší. V ČR má nejpřísnější pravidla státní podnik Lesy ČR, který nepřipouští odchylku větší než 2 % (Šarman, 2019).

Natov a Dvořák (2018) uvádějí, že výsledný rozdíl v celkovém objemu kontrolního měření by neměl překročit 3 %. Nejčastější je však zmiňovaná hodnota odchylky od výrobců strojů 5 %, od které je nutné provádět kalibraci (Nieuwenhuis & Dooley, 2006).

Pokud se však při kontrolním měření ukáže, že měřicí systémy nefungují správně, je nutné je kalibrovat (Schlaghamerský, 2001). Kalibrace je rovněž nezbytná při změně těžebních podmínek, jako je například rozdílná hmotnatost porostu, nebo po opravách součástí hlavice či měřicího systému (Neruda et al., 2022). Kalibraci lze provádět buď manuálně, na základě hodnot rozměrů výřezů měřených ručně, nebo elektronicky (Wojnar, 2007). Elektronická kalibrace se uplatňuje při použití digitálních průměrek, které jsou vybaveny softwarem pro komunikaci s výrobně-evidenčním softwarem harvestoru podle standardu StanForD. Pro měření délek se používá digitální nebo analogové pásmo. Proces elektronické kalibrace je částečně automatizovaný a využívá přednastavené algoritmy jak v průměrce, tak ve výrobně-evidenčním softwaru harvestoru. Tento přístup značně redukuje subjektivitu a chyby způsobené lidským faktorem, proto je také elektronická kalibrace doporučována jako primární metoda pro správné nastavení měřidel na harvestorové hlavici (Natov & Dvořák, 2018). Oba způsoby kalibrace jsou podrobně popsány v Doporučených pravidlech pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018 od Natova a Dvořáka včetně podrobného obrazového návodu.

3.10 Kůra stromů

Kůra (borka) je vnější orgán stromu a její hlavní funkcí je chránit floém a xylém před fyzickým poškozením (Ferrenberg & Mitton, 2014). Kůra chrání pletiva kambia stromu před vnějšími biotickými (např. hmyzem, zvěří, houbami) a abiotickými faktory (např. mráz, sníh, oheň) (Jankovský et al., 2019; Pásztory et al., 2016; Yilmaz et al., 2021; Zeibig-Kichas et al., 2016). Kůra stromů poskytuje útočiště desítkám organismů, je stanoviště různých členovců, obratlovců, lišejníků, mechorostů a dalších živých tvorů. Většina těchto tvorů nepoškozuje prostředí, ve kterém žijí, avšak existují druhy, které stromy poškozují, například dřevomorka nebo kůrovci (Popp et al., 1991).

Kůra je v dnešní době cílem výzkumů po celém světě. U stromů zkoumají odborníci jak tloušťku kůry, tak její celkový objem (Bonyad et al., 2012). Jako příklad lze uvést několik podstatných výzkumů. Například Yilmaz a kol. (2021) zkoumali tloušťku kůry dubových porostů v severozápadním Turecku nebo Bonyad (2012) v Íránu, Jang a kol. (2016) se soustředili na kůru douglasky tisolisté v západní Montaně ve

Skalistých horách. Důvodem, proč se mnoho odborníků určováním tloušťky kůry a jejího objemu zabývá, je využitelnost a důležitost znalosti těchto informací v rámci mnoha průmyslů, které pracují se dřevem. Správné stanovení tloušťky kůry nebo její odhad je také důležitý z hlediska ekonomiky v lesnictví (Stängle et al., 2016). Nepřesné stanovení tloušťky kůry mohou snížit hodnotu pro vlastníka lesa až o 11 % (Musić et al., 2019). Obecně se preferují modely určující tloušťku kůry, které jsou založeny na snadno měřitelných parametrech a nedestruktivním odběru vzorků (Cellini et al., 2012). Menší chybovost při počítání kůry je u stromů s hladší kůrou jako buk a větší u druhů, které mají drsnou kůru jako je dub, topol, borovice či modřín (Atha et al., 2005).

Tloušťka, textura a objem kůry závisí na mnoha faktorech jako například druhu dřeviny, genetice, výšce, věku, tvaru, rychlosti růstu, biologické životaschopnosti a ekologické reprodukční schopnosti (Berrill et al., 2020; Bonyad et al., 2012; West, 2004). Kůra se tak výrazně liší od extrémně drsné po měkkou podle druhu (West, 2004) a prostředí (Zeibig-Kichas et al., 2016). Tloušťka kůry musí být přesně stanovena, aby bylo možné určit objemové zásoby dříví (Costa et al., 2020). Stanovení objemu kůry jsou pro lesníky velmi důležité, protože potřebují znát obchodovatelné objemy kmenů a odečítání objemu kůry od celkového objemu poskytuje nejpohodlnější výpočetní metodu (Jang et al., 2016). Při plánování prořezávek potřebují lesníci vědět tloušťku kůry kvůli odhadu vnitřní tloušťky dříví (tloušťky bez kůry). Tím se zajistí, že pokácené stromy budou splňovat požadavky na minimální tloušťku čepu, aby byly obchodovatelné jako konkrétní sortimenty (Ashton & Kelty, 2018).

Během posledních desetiletí bylo vyvinuto mnoho matematických rovnic, které zohledňují tloušťku kůry mnoha druhů stromů (Brickell, 1970; Cochran, 1976; Maguire & Hann, 1990). Obecně předpovídají tloušťku kůry v jakékoli dané výšce stromu z tloušťky kůry v určité referenční výšce (typicky tloušťka v prsní výšce) (Jang et al., 2016). Vývoj modelů pro určení tloušťky kůry stromů má praktické využití v lesním hospodářství a vědě. Výzkumníci v dendrochronologii používají tloušťku kůry v modelech letokruhů. Vědci v lesnictví mohou použít tloušťku kůry k určení a přesnému odhadu objemu kmene bez destruktivního odběru vzorků externími měřeními (Costa et al., 2021; Li & Weiskittel, 2011; Marshall, Murphy, & Lachenbruch, 2006; Mosaffaei & Jahani, 2021; Sonmez et al., 2007; Thomas & Bennett, 2014). Stanovení tloušťky kůry je také zásadní při posuzování kvality dřeva, protože kůra není brána v úvahu při určování kvality a množství mnoha dřevěných produktů. Proto je třeba při výpočtech souvisejících

s dřevem odečíst tloušťku kůry (Mosaffaei & Jahani, 2021; Sonmez et al., 2007; Thomas & Bennett, 2014). Z těchto důvodů je stanovení tloušťky kůry zásadní (Yilmaz et al., 2021).

Kůra stromu má významné místo mezi zbytky z dřevařského průmyslu, protože může tvořit 10-20 % celkového objemu kmenů (Parikka, 2004). Dle Wehenkela a kol. (2012) objem kůry tvoří odhadem 10 % celkového objemu kmene. Dle jiného výzkumu provedeného ve Spojených státech amerických u více než 150 druhů stromů je podíl kůry z celkového objemu stromu od 12 do 15 % (Miles & Smith, 2009). Stanovit přesné množství ročně vyprodukované kůry je komplikovaný problém, jeho kvantifikace je spojena se značnou nejistotou, protože se obchoduje pouze s malým podílem kůry (Pásztory et al., 2016). Kůra vyprodukovaná v kalifornských pilách se odhaduje na celkem 2,2 až 2,6 milionů tun ročně (Yang & Jenkins, 2008). V Kanadě se ročně vyprodukuje více než 17 milionů m^3 kůry (Feng et al., 2013). Množství kůry odstraněné z vytěženého dříví v Maďarsku dosahuje 500 až 600 tisíc m^3 (Molnár, 2004), v Rusku přibližně 30 milionů m^3 ročně (Melehov et al., 2015; Ushanova, 2012).

Kůra nalezla v rámci staletí své uplatnění. Už lidové léčitelství používalo přípravky z kůry akátu, vrby, jilmu, dubu a jasanu k léčbě nemocí (Rápóti & Romváry, 1997). V nedávných výzkumech se kůra stále více používá jako bioindikátor polutantů ve vzduchu. Použití kůry jako bioindikátoru je výhodné, protože kůra je nepřetržitě vystavena znečištění ovzduší. Má velkou povrchovou plochu pro kontakt se vzduchem a její struktura a poréznost pomáhá udržet znečištění déle než na povrchu listů, kde je může déšť snadno smýt (Böhm et al., 1998; Rimondi et al., 2020). V posledních letech se kůra stromů stala důležitým nedřevním lesním produktem používaným v mnoha odvětvích a výrobách (Dutkuner & Koparan, 2016) a lze ji využít jako vysoce hodnotný biomateriál (Doruska et al., 2009). Zbytky kůry z dřevařského a celulózového průmyslu jsou cenné jako mulč, zdroj tříslovin v kožedělném průmyslu (Pizzi, 2016; Stängle & Dormann, 2018), zdroj biomasy při výrobě energie (Cellini et al., 2012), uhlíkový filtr a palivo do kotle (Costa et al., 2020; Thomas & Bennett, 2014). Díky cennému chemickému složení se stromová kůra stává vhodným materiálem pro využití v kosmetickém průmyslu, potravinářském průmyslu, ale také se řadí mezi nejoblíbenější plodiny, které se sklízejí pro tradiční medicínu (Golubkina et al., 2022; Tanase et al., 2019; Williams et al., 2007).

V neposlední řadě je nutné zmínit také jeden z hlavních směrů využití kůry stromů, čímž je myšlena její tepelná konverze v energetice (Braghiroli & Passarini, 2020; Wenig et al., 2021). Vzhledem k nedostatku surovin je zkoumání alternativních paliv stále více nezbytné (Verkerk et al., 2011). Výhřevnost biomasy dřevní kůry se pohybuje od 15 do 23 MJ·kg−1 v závislosti na hodnoceném druhu (Esteves et al., 2023; Fengel & Gerd, 1983; Martínez-Pérez et al., 2015). Mnoho výzkumníků prokázalo, že kůra má vyšší výhřevnost než dřevo (Holubcik et al., 2017; Kamperidou et al., 2018; Lehtikangas, 2001; Lykidis et al., 2023; Sobol et al., 2023). Jeho energetické využití je nejvíce ovlivněno skutečností, že obsah popela v kůře je mnohem vyšší než ve dřevě (Verkerk et al., 2011).

Výrobny energie založené na biopalivech mohou využívat kůru jako surovinu. Dřevařské podniky, které se specializují pouze na zpracování řeziva, budou však pravděpodobně vyžadovat oddělení objemů kůry od objemů dřeva (Jang et al., 2016). Kůra stromů tedy představuje nejrozšířenější pevný odpad z lesnického a dřevozpracujícího průmyslu, který lze využít mnoha způsoby (Zhao et al., 2021). V rámci lesnického a dřevozpracujícího průmyslu je nutné se odpočty kůry zabývat, aby byly využity vhodné metody pro získání co nejpřesnějšího obchodovatelného objemu dříví bez kůry a objem samotné kůry pro její další zpracování.

3.11 Prodej dříví bez kůry

Metody odhadu dvojité tloušťky kůry (ang. double bark thickness, DBT), které se používají v praxi, bývají často specifické pro jednotlivé země. Tyto metody vycházejí z historického vývoje v daných regionech a reflektují místní potřeby odborníků (Zacco, 1974). Ve střední Evropě se surové dříví obvykle prodává s kůrou, ale odběratelé platí za objem obchodovatelného dříví stanovený bez kůry (Diéguez Aranda et al., 2003). Dříví se měří s kůrou a následně se pomocí různých metod odečítání tloušťky kůry převádí na hodnoty bez kůry (Avery & Burkhart, 2002). Hodnoty objemu dříví v krychlových metrech bez kůry se následně zaznamenávají do lesní hospodářské evidence (Diéguez Aranda et al., 2003). Obchodovatelné objemy dříví nejsou shodné se skutečným objemem dříví. Existují zde ztráty fiktivní a faktické. Mezi fiktivní lze řadit například ztráty způsobené využitím různých typů cen pro stanovení objemu či různých metod odpočtu kůry. K faktickým řadíme neregistrovaný objem v přídavcích k délce u výřezů (nadměrek a řezací okno) či neregistrovaný objem hroubí v těžebních zbytcích (zakrácené špice

stromů, silné větve, pařezy). Analýzám neregistrovaného objemu v přídavcích k délce jsme se věnovali v našich studiích (Dvořák et al., 2020; Löwe et al., 2019).

Standardní metodou zjišťování objemu dříví v ČR je stanovení objemu kmenů pomocí Huberova vzorce na základě délky kmene a střední tloušťky měřené v kůře s použitím modelové dedukce pro dvojnásobnou tloušťku kůry (Wojnar, 2007). Standard StanForD umožňuje evidovat vyrobený objem dříví jak s kůrou, tak bez kůry (Natov & Dvořák, 2018). Na většině výstupů z harvestoru je ale objem výřezu uváděn bez kůry (Wojnar, 2007). Pokud je požadována evidence vyrobeného objemu dříví bez kůry, je nutné zadat hodnoty tloušťky kůry, které budou odečteny od naměřených hodnot tloušťky výřezů změřených s kůrou (Natov & Dvořák, 2018).

Tloušťku kůry lze ve výrobně-evidenčním softwaru harvestoru zadat třemi způsoby:

- Pásmový odpočet
- Parametrický (lineární) odpočet dle SKOGFORSK 2004
- Parametrický (lineární) odpočet

Druhý z nich, parametrický (lineární) odpočet dle SKOGFORSK 2004, se v podmínkách ČR nevyužívá, protože byl vyvinut s ohledem na růstové podmínky pro švédské lesní hospodářství (Natov & Dvořák, 2018) a využívá lineární modely pro jednotlivé dřeviny sestavené pro různé regiony Švédska.

Pásmový odpočet umožňuje zadat hodnoty, kolik milimetrů bude odečteno jako srážka na kůru s ohledem na tloušťková pásma (resp. tloušťkové intervaly) kmene. Dle Doporučených pravidel pro měření a třídění dříví v ČR 2008 (dále jen „DPD“) (Wojnar, 2007) se používá deset tloušťkových pásem. Pro každé z těchto pásem byla stanovena průměrná hodnota tloušťky kůry. Tyto hodnoty jsou uvedeny v Doporučených pravidlech pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR (dále jen „DPE“) (Natov & Dvořák, 2018) v části Přílohy. Pásmové odpočty, které lze zadat do softwaru harvestoru, byly pro jednotlivé skupiny dřevin sestaveny na základě následujících vzorců. Pouze pro modřín byly hodnoty odvozeny od Valenty (2015).

Objem výřezu před odkorněním se stanoví podle následujícího vzorce:

$$V_{bk} = \frac{\pi}{4} * (d_{sk} - 2k)^2 * l * 10^{-4}$$

kde: V_{bk} – objem bez kůry v metrech krychlových; d_{sk} – středová tloušťka měřená v kůře v centimetrech; k – tloušťka kůry v centimetrech; l – délka výřezu v metrech.

Hodnota dvojnásobku tloušťky kůry je dána vztahem:

$$2k = p_0 + p_1 \times d_{sk}^{p_2}$$

kde: k – tloušťka kůry v centimetrech; d_{sk} – tloušťka výřezu měřená v kůře v centimetrech; p_0 až p_2 – parametry funkce závislosti tloušťky kůry na tloušťce výřezu, stanovené pro jednotlivé dřeviny (Tabulka 2).

Tabulka 2: Parametry funkce při odpočtu na kůru.

Dřevina	**p0**	**p1**	**p2**
smrk	0,57723	0,006897	1,3123
borovice-kůra	0,24017	0,001915	1,7866
borovice-borka, modřín	1,7015	0,008762	1,4568
buk	0,04088	0,16634	0,56076
dub	1,2474	0,042323	1,0623

Zdroj: Wojnar, 2007

Parametrický model používaný v současném lesním hospodářství ČR je polynomický a není standardem StanForD podporován. StanForD umožňuje parametrický odpočet kůry pouze lineárně (Natov & Dvořák, 2018). Natov s Dvořákem (2018) proto vytvořili vhodný lineární model, který se co nejvíce blíží polynomu, který je používán v podmínkách lesního hospodářství ČR. Tento model používá parametry, které jsou uvedeny v tabulce č. 3. Tyto parametry byly navrženy specificky pro podmínky českého lesního hospodářství a vycházejí z publikace Tabulky a polynomy pro výpočet objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře (dále jen „TaP“) (Černý & Pařez, 2009). Pro různé druhy dřevin jsou stanoveny různé hodnoty jednotlivých parametrů. Kromě toho se hodnoty parametrů pro borovici lesní liší v závislosti na tom, zda výřezy obsahují hrubou (oddenkovou) kůru nebo normální tloušťku kůry (Natov & Dvořák, 2018). K nastavení odpočtu tloušťky kůry, resp. odečtu objemu kůry, je nutné

přistupovat velmi citlivě, a to především při zpracování smrku napadeného lýkožroutem smrkovým, kdy je část kůry opadaná a mohlo by dojít k nežádoucímu odečtu kůry.

Tabulka 3: Parametry lineální funkce sestavené Natovem & Dvořákem (2018) pro srážku kůry dle standardu StanForD

y = a + b*d	**A**	**B**
SM, JD (mm)	4,23	0,0269
BO kůra, VJ, DG (mm)	0,00	0,0482
BO borka (mm)	12,24	0,0633
MD (mm)	2,02	0,0637
BK, JV, HB, JŘ, LP, OS (mm)	3,52	0,0217
DB, JL, JS, BŘ, OL, TP (mm)	11,65	0,0560

V ČR se objem dříví bez kůry obvykle stanovuje na základě (i) měření střední tloušťky měřené v kůře (ve dvou kolmých měřeních), zaokrouhleného dolů na nejbližší centimetr a (ii) změřené jmenovité délky výřezu nebo kmene (Laar & Akça, 2007). Od roku 2002 se při výrobě a obchodu s jednotlivými sortimenty dříví používají Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví (Indra, 2002), která byla v roce 2007 Wojnarem aktualizována. Standardní metodou zjišťování objemu dříví podle těchto tabulek je stanovení objemu kmenů pomocí Huberova vzorce podle délky kmene a střední tloušťky měřené v kůře s použitím modelové dedukce pro dvojnásobnou tloušťku kůry (Husch et al., 2003). Standardní tabulky používané pro stanovení objemu kulatiny jsou DPD (Wojnar, 2007) a TaP (Černý & Pařez, 2009). Valenta (2015) dále jen VAL sestavil rovnici pro stanovení dvojité tloušťky kůry přímo pro modřín. Jelikož výše zmíněné metody neuvažují elektronické měření dříví harvestory, Natov a Dvořák (2018) odvodili hodnoty pro pásmový odpočet kůry a parametrický (lineární) odpočet, které uvádějí v DPE. DPE slouží jako manuál pro práci s výrobně – plánovacím a výrobně-evidenčním systémem harvestorů. Popisuje doporučená nastavení softwaru harvestorů, která splňují požadavky standardu StanForD Classic (Skogforsk, 2012a) a zajišťují dodržování platných českých předpisů lesního hospodářství a DPD (Wojnar, 2007). Účelem těchto tabulek bylo identifikovat klíčové rozdíly mezi metodami měření dříví používanými systémy harvestorů a harmonizovat postupy stanovení objemu používané v elektronickém měření. Tabulky dále popisují softwarová nastavení, která mají přímý vliv na výsledný vyrobený objem dříví, jako je výběr druhu dřeviny, metoda odkornění, typ ceny (určuje algoritmus pro stanovení objemu) a typ délky použité pro stanovení objemu (Natov & Dvořák, 2018). Pro stanovení objemu dříví je nutné nejprve vybrat typ ceny. StanForD nabízí 14 typů

cen, které používají sedm různých algoritmů. Pro české lesnictví jsou zajímavé tři z těchto typů cen – M3s, M3toDE a M3miDE. První, typ ceny M3s, představuje stanovení objemu nejblíže skutečnému objemu a takový, který lze použít jako referenční. Typ ceny M3s vychází ze stanovení dílčích objemů 10 cm dlouhých sekcí, které se následně sečtou. Celkový objem tak vždy vyjadřuje součet všech objemů jednotlivých sekcí. Dva další typy cen, M3toDE a M3miDE, používají stejný algoritmus založený na Huberově vzorci a metodě HKS (Husch et al., 2003; Skogforsk, 2012b). Popis objemu dříví stanovených podle různých typů cen je detailně uveden ve 3. článku této disertační práce. Natov a Dvořák (2018) proto navrhují používat typy cen M3toDE nebo M3miDE, které využívají stejný princip stanovení objemu, jaký požadují DPD (Wojnar, 2007).

4 Metodika

4.1 Sběr dat

Data pro články byla získána z harvestoru John Deere 1270E vybaveného harvestorovou hlavicí Waratah 480C. Tento harvestor je stroj středního výkonu, což je nejběžnější třída harvestorů v České republice (MZe, 2023). Výrobně evidenční systém TimberMatic (verze 1.19, Deere & Company: Moline, IL, USA) ukládal data ve sjednoceném standardu StanForD Classic (Skogforsk, 2012a). Data byla sbírána mezi březnem 2017 a červnem 2018. S tímto strojem byly po celé České republice prováděny převážně mýtní úmyslné a v menší míře nahodilé těžby. Harvestor téměř výhradně zpracovával jehličnaté stromy. První článek byl zaměřen na borovici lesní (*Pinus sylvestris*), která představovala 10 % všech stromů zpracovaných tímto strojem. Druhý článek se zaměřil na data modřínu opadavého (*Larix decidua*), který tvořil 1,4 % zpracovaných stromů. Ve třetí studii jsme analyzovali dříví smrku ztepilého (*Picea abies*) s podílem 87,8 % zpracovaných stromů. Celkem bylo zpracováno harvestorem 46 605 stromů, ze kterých bylo vyrobeno 267 947 výřezů.

Výrobně-evidenční systém harvestorů byl nakonfigurován tak, aby automaticky ukládal soubory s výřezy (*.stm), které obsahovaly různé metriky (např. délku a tloušťku) pro každý těžený strom. Každý kmen byl automaticky krácen, tzv. druhován, podle nastavení kategorizace sortimentů. Soubory kmenů obsahovaly naměřené tloušťky po každých deseti centimetrech délky výřezu, stejně jako stanovení objemu dle typu ceny „M3s“ každého výřezu. Skogforsk (2012b) uvádí, že stanovení objemu pomocí algoritmu typu ceny „M3s“ je nejblíže reálnému objemu výřezu. Při stanovení objemu podle tohoto algoritmu se tloušťka s kůrou měří na každém konci 10 cm dlouhého segmentu výřezu. Tato měření jsou pak zprůměrována, čímž se segment přibližuje válci. Průměr z těchto dvou měření se pak používá jako vstupní tloušťka pro výpočet objemu segmentu podle Huberova vzorce (Husch et al., 2003). Objem každého výřezu je nakonec vyjádřen jako součet objemů všech jeho deseticentimetrových segmentů.

Pro zajištění přesnosti měření délky a tloušťky bylo na začátku každého pracovního dne provedeno kontrolní měření, při kterém bylo pomocí digitální průměrky Haglöf Digitech Professional II, vybaveného digitálním pásmem Digitech Tape a softwarem Skalman 6.11 (Haglöf Sweden AB: Långsele, Švédsko), změřeno 3–5 stromů. V případě

potřeby byla měřidla délky a tloušťky v hlavici stroje automaticky kalibrována. Kalibrace systému splňovala požadavky standardu StanForD.

4.2 Zpracování a kategorizace dat

Data v souborech *.stm byla stažena z výrobně-evidenčních softwarů harvestorů, uložena a následně převedena do pracovního souboru *.XLSX, do formátu souboru MS Excel, pomocí aplikace STeMa, verze 1.0 (autor: Natov; rok vzniku: 2016). Aplikace STeMa byla speciálně navržena pro analýzu souborů *.stm uložených harvestory a splňuje požadavky standardu StanForD Classic. Aplikace STeMa byla vytvořena ve skriptovacím jazyce PHP jako webová aplikace s autorizovaným přístupem. Aplikace nemá grafické uživatelské rozhraní a funguje prostřednictvím přímé editace zdrojového kódu. Data byla zkontrolována a odstraněny duplicitní soubory, anomálie a extrémní hodnoty.

Kmen pokáceného stromu byl harvestorem krácen na jednotlivé výřezy. Každý výřez představoval sortiment, který splňoval požadavky dané zákazníkem (tj. dřevina, čepová tloušťka, požadovaná jmenovitá délka, jakost). Operátor harvestoru určil dřevinu a kvalitu dříví; poté software stroje na základě předem nastavených kvantitativních parametrů navrhl konkrétní sortiment k výrobě. S ohledem na potřebu následného porovnání výsledků s výzkumy v zahraničí byly rozlišovány tři skupiny sortimentů: (i) Těžební zbytky/Palivové dříví (firewood), což byla kvalitativně nejnižší třída dříví určená pro energetické využití; (ii) Vláknina (pulpwood), dříví určené k výrobě buničinových produktů; a (iii) Kulatina (roundwood), což byla nejvyšší třída dříví určená pro průmyslové zpracování, řezivo, sloupy atd.

4.2.1 Objem s kůrou a bez kůry u borovice a modřínu

Objem každého výřezu byl stanoven pomocí algoritmu typu ceny M3toDE (VM3toDE). Tento objem byl stanoven na základě jmenovité délky a střední tloušťky výřezu měřené v milimetrech a zaokrouhlené dolů na nejbližší celý centimetr pomocí metody HKS (BW-HKS, 1983). Objem výřezu byl stanoven podle rovnice (1):

$$V_{M3toDE} = \pi \times \left(\frac{\frac{MD^2}{4}}{10000} \right) \times \frac{RL}{100}$$

kde: V_{M3toDE} – objem výřezu podle typu ceny *M3toDE* v metrech krychlových s kůrou, π = 3,14, *MD* – střední tloušťka v centimetrech, *RL* – jmenovitá délka v centimetrech.

V Česku byla sestavena Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018 (Natov & Dvořák, 2018). Proto byly pro stanovení objemu dříví bez kůry na základě typu ceny M3toDE použity dvě metody odpočtu kůry, které jsou v této publikaci uvedeny a jsou podporovány softwarem harvestorů. Jednalo se o pásmový a lineární (parametrický) odpočet kůry. V obou těchto případech jsou nastaveny samostatné hodnoty pro borovici a modřín. Naopak DPD (Wojnar, 2007) a TaP (Černý & Pařez, 2009) nerozlišují dvojitý odpočet tloušťky kůry pro modřín samostatně, ale používají pro něj stejné hodnoty jako pro borovici. DPD (Wojnar, 2007) při srážce na kůru u modřínu používají odpočtovou kategorii borovice – oddenky. TaP (Černý & Pařez, 2009) modřín při odpočtu řadí do kategorie borovice – kůra.

Níže jsou uvedeny jednotlivé metody odpočtu kůry, které byly v prvním a druhém článku této práce využity.

- pásmový odpočet kůry (metoda použitelná v softwaru harvestorů)
- parametrický (lineární) odpočet kůry (metoda použitelná v softwaru harvestorů)
- metoda odpočtu kůry dle Valenty 2015 (parametrická nelineární funkce, nelze ji tedy použít v softwaru harvestorů) – použito pouze v případě článku na modřínové dříví
- metoda odečtení kůry dle DPD (Wojnar, 2007) (parametrická nelineární funkce, nelze ji tedy použít v softwaru harvestorů)
- metoda odpočtu kůry dle TaP (Černý & Pařez, 2009) (parametrická nelineární funkce, nelze ji tedy použít v softwaru harvestorů) - použito pouze v případě článku na modřínové dříví

4.2.2 Typy cen a jejich algoritmy pro stanovení objemu

Software TimberMatic umožňuje použít k výpočtu objemu 14 různých výpočtových vzorců – typů cen (viz kap. 3. 8). Ve třetím článku jsme analyzovali 7 z těchto typů cen. Zbylé vzorce byly z analýzy vyloučeny, protože způsob výpočtu objemu nebyl řádně popsán, nebo sloučeny, protože obsahovaly stejný algoritmus pro stanovení objemu dříví. Všechny tloušťky výřezů byly měřeny s kůrou. Objem výřezů byl stanoven v metrech krychlových včetně kůry a počítán z jmenovité délky.

4.3 Statistická analýza

Statistické analýzy byly provedeny ve statistických softwarech R a Statistica 13. Pro všechny statistické testy byla zvolena hladina významnosti $\alpha = 5$ %. Popisná statistika byla použita k získání průměrných a souhrnných hodnot jednotlivých proměnných. Normalita dat byla vždy testována pomocí Kolmogorov-Smirnovova testu normality. U prvního a druhého článku byly použity Párové Wilcoxonovy testy k testování rozdílů mezi objemy dříví s kůrou stanovenými podle typů cen M3s a M3toDE. Friedmanova ANOVA byla použita k testování rozdílů mezi stanovením objemu dříví bez kůry podle M3toDE s různými předem stanovenými metodami odpočtu kůry (první a druhý článek). ANOVA byla také využita pro testování rozdílů v stanovených objemech dříví mezi algoritmy, a to jak pro veškeré dříví dohromady, tak rozdělené podle sortimentů (třetí článek). Pro vícečetná srovnání byl použit Neményiho post-hoc test, následovaný Bonferroniho metodou pro korekci p-hodnoty (1. a 2. článek). U třetího článku byly Post-hoc testy (Tukey HSD) použity k zjištění rozdílů mezi stanovením objemů dříví podle příslušných algoritmů.

5 Přehled publikovaných prací

Souhrn publikovaných prací je rozdělen do dvou tematických okruhů, které byly rovněž podrobně popsány v metodické části. První dva články se věnují analýze rozdílů mezi objemy dříví stanovenými s kůrou a bez kůry u borovice a modřínu. U obou těchto článků je dizertant prvním autorem. Tato sekce se skládá ze dvou prací publikovaných v časopisech s impakt faktorem. Druhý okruh se zabývá analýzou metod výpočtu objemu výřezů podle standardu StanForD a zjišťuje rozdíly mezi objemy výřezů stanovenými jednotlivými algoritmy typů cen. U tohoto impaktovaného článku je dizertant na druhém místě autorského kolektivu. Všechny tři cíle stanovené v této disertační práci byly splněny. Závěrem jsou ještě zmíněny dva články, jejichž je dizertant spoluautorem – tyto články se také zabývají výrobně-evidenčním softwarem harvestorů, ale nejsou přímo propojeny s cíli v zadání disertační práce.

5.1 Zjišťování objemu dříví borovice lesní vyrobeného harvestory s kůrou a bez kůry

Originální název: Estimation of Over- and Under-Bark Volume of Scots Pine Timber Produced by Harvesters

Sedmíková, M.; Löwe, R.; Jankovský, M.; Natov, P.; Linda, R.; Dvořák, J. Estimation of Over- and Under-Bark Volume of Scots Pine Timber Produced by Harvesters. *Forests* 2020, *11*, 626. https://doi.org/10.3390/f11060626

Cílem této studie bylo analyzovat stanovení objemu dříví borovice lesní (*Pinus sylvestris*) s kůrou a bez kůry vyrobené středně výkonným harvestorem. Pro stanovená objemu nabízí standard StanForD několik typů cen využívajících různé algoritmy. Tři z těchto typů cen jsou použitelné pro české lesnictví – M3s, M3toDE a M3miDE. Typ ceny M3s je založen na stanovení dílčích objemů v deseticentimetrových sekcích, které jsou sečteny. Tento typ ceny tedy představuje stanovení objemu nejbližší skutečnému objemu. Naopak typy cen M3toDE a M3miDE používají stejný algoritmus pro stanovení objemu, který je založen na principu Huberova vzorce, který využívá střední tloušťku zaokrouhlenou dolů na nejbližší celý centimetr. Typ ceny M3toDE podhodnotil objem s kůrou o 6,48 % ve srovnání s referenčním typem ceny M3s. Průměrný objem dříví stanovený pomocí typu ceny M3s byl významně vyšší než objem M3toDE jak v jednotlivých třídách vyráběných sortimentů, tak bez třídění.

Zjistili jsme významné rozdíly mezi stanovením objemu bez kůry metodou odpočtu kůry podle pásmových odpočtů a parametrickým (lineárním) odpočtem používaným v softwarech harvestorů podle Doporučených pravidel pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018 (Natov a kol., 2018). Kalkulováno bylo s kategorií s normální tloušťkou kůry, ale i kategorií oddenkové kusy s hrubší kůrou. Pro stanovení objemu dříví borovice lesní bez kůry, který je srovnatelný s Doporučenými pravidly pro měření a třídění dříví v ČR 2008 při využití parametrické nelineární (polynomické) metody odpočtu kůry (Wojnar, 2007), doporučujeme v softwaru harvestoru využít algoritmus typu ceny M3toDE s dvojnásobnou tloušťkou kůry určenou metodou odpočtu kůry podle pásmových odpočtů.

forests

MDPI

Article

Estimation of Over- and Under-Bark Volume of Scots Pine Timber Produced by Harvesters

Monika Sedmíková, Radim Löwe, Martin Jankovský *, Pavel Natov, Rostislav Linda and Jiří Dvořák

Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 16521 Prague 6-Suchdol, Czech Republic; sedmikovam@fld.czu.cz (M.S.); lowe@fld.czu.cz (R.L.); natov@fld.czu.cz (P.N.); lindar@fld.czu.cz (R.L.); dvorakj@fld.czu.cz (J.D.)

* Correspondence: jankovskym@fld.czu.cz; Tel.: +420-224-383-729

Received: 24 April 2020; Accepted: 28 May 2020; Published: 2 June 2020

check for updates

Abstract: Harvesters produce one third of timber in Czechia. The aim of this study was to analyze the over- and under-bark volume estimates of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) timber produced by a mid-performance harvester. The data were collected between March 2017 and June 2018. In total, 4661 stems cut into 29,834 logs were analyzed. For volume estimation, StanForD offers several price categories using various algorithms. Three of these price categories are relevant for Czech forestry—M3s, M3toDE, and M3miDE. The M3s price category is based on the estimation of partial volumes of 10 cm long sections, which are summed. Therefore, this price category represents the volume estimation closest to the true volume. By comparison, the M3toDE and M3miDE price categories use the same algorithm for volume estimation, which is based on the Huber formula using a midspan diameter rounded down to the nearest whole centimeter. The M3toDE price category underestimated the over-bark volume by 6.48% compared to the reference price category M3s. The mean log volume estimated through the M3s price category was significantly higher than the M3toDE volume both in individual grades and without grading. We found significant differences between under-bark volume estimates by the diameter band bark deduction method (DBM) and the parametric linear bark deduction method (PLM) used in harvester's systems according to the Guidelines for Electronic Scaling of Timber for Harvesters in Czechia (GEH) for Scots pine butt logs with rough bark, and also for other logs with normal bark thickness. To obtain under-bark volume estimates of Scots pine timber that are comparable with the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (GTS) using the parametric nonlinear bark deduction method (PNM), we recommend using the algorithm of the M3toDE price category, with double bark thickness determined by the diameter band bark deduction method.

Keywords: *Pinus sylvestris*; StanForD; stem file; log; double bark thickness

1. Introduction

The use of harvester technology is closely linked to the cut-to-length (CTL) logging method [1]. This method represents a series of operations, during which standing trees are converted into timber assortments directly at the stump location [2]. Mechanized harvesting increases productivity and reduces production costs compared to motor-manual logging [3–6]. Therefore, the CTL method is currently almost exclusively used for harvesting in some European countries, such as Finland, Sweden, and Norway [7,8]. Due to its high productivity, greater expansion in Czechia and other Central and Eastern European countries can be expected, in connection to addressing the bark beetle crisis.

However, there are barriers to increasing the share of mechanized CTL harvesting. Ferrari et al. [9] mentions, in particular, the large capital expenses needed to purchase the machinery, followed

by technical constraints such as terrain configuration or species composition in a given region. Additionally, a study conducted in the northeastern US showed that conventional whole-tree methods are more productive than the CTL logging method when harvesting small-diameter trees [10]. These obstacles reduce the potential share of timber processed by harvester technology in other European countries [11,12]. In Czechia, the share of timber produced by harvesters was 32% in 2018 [13] and, according to Dvořák et al. [14], may reach 50% in the future.

Harvesters can help substantially with streamlining the process of keeping production records, particularly those related to the volume of produced timber and its parameters. In practice, the volume of timber is estimated during or after harvest, and the accuracy of the estimates is vital, because the volume directly translates to the revenues of forestry enterprises. The sale of timber is the primary source of revenue in forestry. In addition to the effects of the accuracy of volume estimates on revenue, the estimates also serve as inputs into forest management records and are used in industrial statistics [15].

The correct determination of the volume of an object depends on its shape. In forest mensuration, the most widely used sectional methods for volume estimation based on tree stem geometry are the Smalian, Huber, and Newton formulas. Each of these methods calculates volume based on cross-sectional areas (circular), measured either at the log ends (Smalian), at its mid-point (Huber), or at both ends and mid-point (Newton) [16]. The Newton formula gives the most exact results for all classical geometries, such as paraboloid, cone, and neoloid [17]. However, Smalian and Huber formulas are preferred in the field, because they are easier to apply, especially with regard to manual measurement. When comparing the Huber and Smalian formulas, the first is more accurate [16]. It is difficult to decide which geometric shape best fits a stem, because the average tree stem tapers into a truncated neoloid at the lowest part, a truncated paraboloid at the central section, and a paraboloid or cone at the top [18,19]. Moreover, it is virtually impossible to know exactly where one geometry ends and another begins [20]. In practice, we cannot obtain a uniform stem shape in the forest. Historically, the Huber method has been preferred to Smalian method in Europe [21].

In order to harmonize the various methods and techniques of timber scaling and grading, guidelines for measuring and sorting timber have gradually been developed in most countries. Therefore, we can find different approaches to estimating the volume of timber, and to using these data to sell and record timber [22–24].

In Central Europe, raw timber is usually sold with the bark, though customers pay for the volume of merchantable timber, estimated under the bark. Values of timber volume in cubic meters under bark are then entered into the forest management records [25]. Finnish foresters typically employ a combined sawmill and harvester measurement system of timber procurement, where timber is first measured by the harvester and then at the sawmill. The sawmill measurement technology is considered to be more reliable and accurate. Therefore, this method is the point, to which the harvester data is referenced, resulting in errors of ±4% by the Finnish standards [26]. Use of harvester technology requires thorough familiarity with machine management, control, and information systems and their settings. Data from these systems can be used as valid production records, provided the machines are set up correctly and the measurement accuracy is regularly checked. Measurements are made over-bark (o.b.) and subsequently converted to under-bark (u.b.) data using various bark thickness deduction methods [27].

In Czechia, the under-bark volume of timber is typically estimated based on (i) the over-bark, midspan diameter (in two perpendicular measurements), rounded down to the nearest centimeter and (ii) the required length of a log or stem [28]. Since 2002, the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (GTS) have been used in the production and trade of individual timber assortments [23], and fully govern a large number of contracts between suppliers and customers. According to the GTS [23], the under-bark volume of a log is estimated through the Huber formula [22]. If diameters are measured over bark, the parametric nonlinear bark deduction method (PNM) is used to deduct the double bark thickness. The parameters of the nonlinear models are based on the Czech Cubing Tables (CCT) specified in the ČSN 48 009 technical standard [29].

The GTS only briefly describe measurements with specialized machines, such as harvesters. Therefore, Natov and Dvořák [30] compiled the Guidelines for Electronic Scaling of Timber for Harvesters in Czechia (GEH). The GEH serve as a manual for working with the wood procurement, control, and information systems of harvesters. They describe the recommended settings of harvester systems that meet the requirements of the StanForD Classic standard [31] and ensure that valid Czech forest management regulations, as well as the GTS, are respected [30]. The intended purpose of the GEH was to identify the key differences between the methods of timber scaling used by harvester systems and harmonization of volume estimation practices used in electronic scaling.

The main sources of differences between the timber volume outputs from the harvester measurement systems are the algorithm used for volume estimation [15] and the method used for double bark thickness deduction [27]. The GEH describe the software settings that have a direct effect on the resulting volume of timber recorded by harvesters, such as selecting the tree species, bark deduction method, price category (which determines the algorithm for volume estimation), and length used for volume estimation. To estimate the timber volume, it is first necessary to select the price category. StanForD [32] offers 14 price categories that use seven different algorithms [15]. The differences between these algorithms in volume estimations of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) logs were discussed by Löwe et al. [15]. Three of these price categories are relevant to Czech forestry—M3s, M3toDE, and M3miDE. The first, the M3s price category, represents the volume estimation closest to the true volume [32] and, as such, can be used as a reference. The M3s price category is based on the estimate of partial volumes of 10-cm-long log sections, which are then summed (Newton method principle). The total volume of the log thus always represents the sum of all volumes of the log sections. The two other price categories, M3toDE and M3miDE, both use an algorithm for volume estimation based on the Huber formula [22] and the Handelsklassensortierung (sorting of merchantable timber, HKS) method [33]. The detailed description of log volumes estimated according various to price categories was described by Löwe et al. [15].

Löwe et al. [15] pointed out that if the M3toDE and M3miDE price category algorithms are used, timber production is significantly underestimated. Nevertheless, the GEH [30] promote using the M3toDE or M3miDE price categories, as they use the same principle of volume estimation as required by the GTS [23]. For volume estimation, the use of required length must be set in the harvester system. If it is necessary to express the under-bark volume of timber, the GEH offers two bark deduction methods that can be used in Czechia: (i) the diameter band bark deduction method (DBM) and (ii) the parametric linear bark deduction method (PLM). It is not possible to use the PNM according to the GTS, because polynomial functions are not supported by StanForD. The DBM allows setting the thickness (in millimeters) to be deducted from the midspan diameter as the double bark thickness with respect to the diameter interval, to which the log belongs. The values of double bark thickness are based on the CCT [29]. The parameters for PLM were modified from parameters issued by Skogforsk [32], because original parameters were created for the growth conditions of Swedish forestry. The parameters used for PLM according to the GEH were created based on the CCT [29]. Different parameters are used for various tree species. Moreover, the parameters for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) differ even for one stem, depending on whether stems include rough (butt log) bark or normal bark thickness.

This study deals with the determination of the over-bark volume differences of pine logs produced by harvesters and the subsequent differences of under-bark volume estimates resulting from using bark deduction methods recommended by the GEH [30] compared to the polynomial function reported by GTS [23]. The aims of this study are: (i) to confirm that the volume estimated using the M3toDE price category algorithm significantly underestimates the volume compared to the M3s price category algorithm, (ii) to analyze the differences between over-bark volumes estimated by M3s and M3toDE price categories for various assortment grades, (iii) to analyze the differences between over-bark volumes estimated by M3s and M3toDE price categories for various required length categories, (iv) to analyze the differences between M3toDE under-bark volumes obtained by three different bark deduction methods (DBM, PLM, PNM), using parameters for Scots pine stems with rough bark

(butt logs), and (v) to analyze the differences between M3toDE under-bark volumes obtained by three different bark deduction methods (DBM, PLM, PNM), using parameters for Scots pine stems with normal bark thickness.

2. Materials and Methods

2.1. Data Collection

Data were obtained from a John Deere 1270E harvester equipped with a Waratah 480C harvester head. The harvester was a mid-performance machine, the most common harvester class in Czechia [34]. The TimberMatic control and information system (1.19, Deere & Company: Moline, IL, USA) saved data in the unified StanForD Classic standard [31]. The data were collected between March 2017 and June 2018. Mainly final and salvage fellings were carried out with the machine throughout Czechia. The harvester almost exclusively processed coniferous trees. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) represented almost 10% of all stems processed by the machine. We used the same data set as Löwe et al. [15], however in this study, we only used Scots pine data.

The control and information system of the harvester was pre-set to automatically save stem files (.stm), which contain metrics (such as length and diameter data) of each felled tree [35]. Each stem was cut into 1–14 logs. The stem files contained measured diameters for every 10 cm of log length, as well as the M3s volume estimate of each log.

To ensure accuracy of length and diameter measurements, a control measurement was carried out at the beginning of each work day by measuring 3–5 trees with a Haglöf Digitech Professional II digital caliper, equipped with a Digitech Tape and Skalman 6.11 software (Haglöf Sweden AB: Långsele, Sweden). If necessary, length and diameter gauges were automatically calibrated in the harvester head of the machine. A detailed procedure for control measurement and calibration was described by Löwe et al. [15].

2.2. Data Processing and Categorization of Assortments

Data stored in stem files were transferred to MS Excel file format. For the data conversion, we used the STeMa application, version 1.0 (author: Natov P., year 2016). The application can read and extract data from stem files in the StanForD Classic standard. The resulting database was cleared of extreme values. A total of 4661 stem files were analyzed, containing data on 29,834 produced logs. The converted variables were as follows:

- Tree species (TS)—distinguished the tree species (this study used only Scots pine logs).
- Assortment (AS)—contained information about the inclusion of the log into the assortment according to the required parameters of customers.
- Midspan diameter (MD)—expressed the log diameter (in mm over bark) measured in the middle of its required length.
- Top end diameter (TD)—expressed the log diameter (in mm over bark) measured at the end of the log required length and served as one of the quantitative parameters for classifying the log into assortments.
- Total length (TL)—contained the value of the real length of the log (in cm).
- Required length (RL)—contained the value of the minimum required length of the log (in cm) for the given assortment.
- Over-bark volume of a log according to the M3s price category (V_{M3s})—expressed the log volume (in m^3 over bark) estimated by using the required length of the log.

We estimated the volume of each log using the algorithm of the M3toDE price category (V_{M3toDE}). This volume was estimated based on the required length and the midspan diameter measured in millimeters and rounded down to the nearest whole centimeter using the HKS method [33]. The log volume was estimated according to Equation (1):

$$V_{M3toDE} = \pi \times (MD^2/4/10000) \times RL/100 \quad (1)$$

where V_{M3toDE} is the log volume according to the M3toDE price category (m^3 over bark), $\pi = 3.14$, MD is the midspan diameter (cm), RL is the required length (cm).

The principle of estimating volume according to the M3s and M3toDE price categories is graphically illustrated in Figure 1.

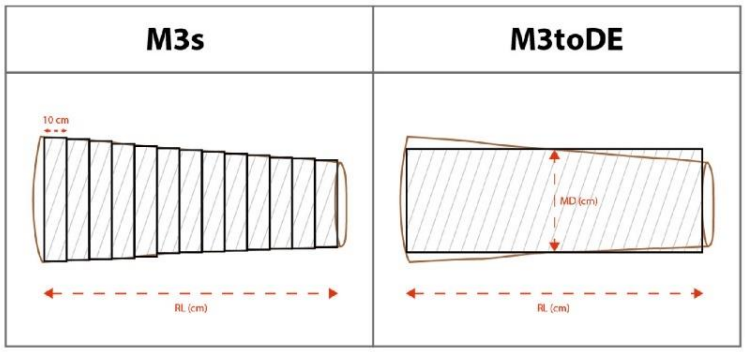


Figure 1. The principle of estimating timber volume according to the M3s and M3toDE price categories. The volume estimated using the M3s price category is based on the estimation of partial volumes of 10 cm long sections, which are then summed. In contrast, the M3toDE price category estimates volume based on the midspan diameter (MD) of the log rounded down to the nearest whole centimeter. Both price categories express the volume of the log using its required length (RL).

Each log produced by the harvester represented a certain assortment that met specific requirements of the customer (tree species, top end diameter, required length, grade). When the tree was cut, the harvester operator first determined the tree species and the quality of timber, then the machine software suggested a specific assortment to be produced based on pre-set quantitative parameters. The same grading method was also used by Löwe et al. [15]. Logs were also categorized according to their required length and midspan diameter. Table 1 shows the relative distribution of required lengths and midspan diameters of logs in the span of 100 mm over bark for diameters and 100 cm for length.

Table 1. The relative distribution of required lengths and midspan diameters of logs.

Midspan Diameter	All Logs	Assortment Grade		
		Roundwood	Pulpwood	Firewood
0–100 mm o.b.	6.5%	0.0%	6.7%	33.5%
101–200 mm o.b.	42.6%	15.4%	62.5%	56.8%
201–300 mm o.b.	37.7%	59.6%	25.0%	8.4%
301–400 mm o.b.	11.9%	22.5%	5.2%	1.3%
401–500 mm o.b.	1.2%	2.3%	0.5%	0.0%
501–600 mm o.b.	0.1%	0.2%	0.1%	0.0%
601–700 mm o.b.	<0.1%	0.0%	<0.1%	0.0%
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
Required Length				
0–100 cm	1.2%	0.0%	0.0%	12.6%
101–200 cm	54.7%	0.0%	100.0%	56.9%
201–300 cm	24.1%	52.3%	0.0%	27.2%
301–400 cm	20.0%	47.7%	0.0%	3.3%
	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Notes: o.b.—over bark.

2.3. Bark Deduction Methods and Under-Bark Volume Estimates

To estimate the under-bark volume according to the M3toDE price category, two bark deduction methods (the DBM and the PLM) available in the control and information systems according to the GEH [30] were used. Then, the PNM according to the GTS [23] was used as a reference to enable comparison of the bark deduction method accuracy.

The double bark thickness values within the DBM were determined for 10 diameter bands published by Wojnar [23] and are shown in Table 2. The second method used for determining the bark deduction was PLM. The parameters of the linear model were fitted for Czech growth conditions [30] and were limited by the upper margin of the midspan diameter to 700 mm over bark, because most harvesters in the Czechia are equipped with harvester heads that can process logs up to that diameter [36]. Equation (2) was used to calculate the double bark thickness according to the PLM:

$$DBT_{PLM} = a + MD \times b \quad (2)$$

where DBT_{PLM} is the double bark thickness according to the PLM (mm over bark), MD is the measured midspan diameter (mm), $a = 0.00$ and $b = 0.0482$ (for Scots pine logs with normal bark), or $a = 12.24$ and $b = 0.0633$ (for Scots pine butt logs with rough bark).

Table 2. The double bark thickness values of the diameter band bark deduction method (DBM) used for under-bark volume estimation of Scots pine timber in harvester systems according to the GEH [30]. The values for each diameter band vary depending on whether it is a butt log with rough bark or a log with normal bark thickness.

Scots Pine (*Pinus sylvestris*)		
Midspan Diameter (mm o.b.)	**Double Bark Thickness (DBT_{DBM}, mm)**	
	Butt Logs (Rough Bark)	**Logs (Normal Bark)**
0–79	17.71	2.86
80–149	20.00	4.14
150–219	22.86	5.71
220–289	26.57	8.43
290–359	30.71	11.71
360–429	35.29	15.86
430–499	40.14	20.29
500–569	45.43	25.43
570–639	51.14	31.14
640–700	57.00	37.43

Notes: o.b.—over bark, DBT_{DBM}—double bark thickness according to the diameter band bark deduction method.

To compare, the double bark thickness was also determined by the PNM, as reported by Wojnar [23]. The parameters of the PNM are, similarly to the PLM, based on the CCT [29]. However, the PNM uses a quadratic equation, and therefore cannot be used in the harvester system. The Equation (3) was used to calculate the double bark thickness according to the PNM:

$$DBT_{PNM} = p_0 + p_1 \times MD^{p2} \quad (3)$$

where DBT_{PNM} is the double bark thickness according to the PNM (mm over bark), MD is the measured midspan diameter (mm), $p_0 = 0.24017$, $p_1 = 0.001915$ and $p_2 = 1.7866$ (for Scots pine logs with normal bark), or $p_0 = 1.7015$, $p_1 = 0.008762$ and $p_2 = 1.4568$ (for Scots pine butt logs with rough bark).

A graphical comparison of the double bark thickness curves of all three bark deduction methods is shown in Figure 2.

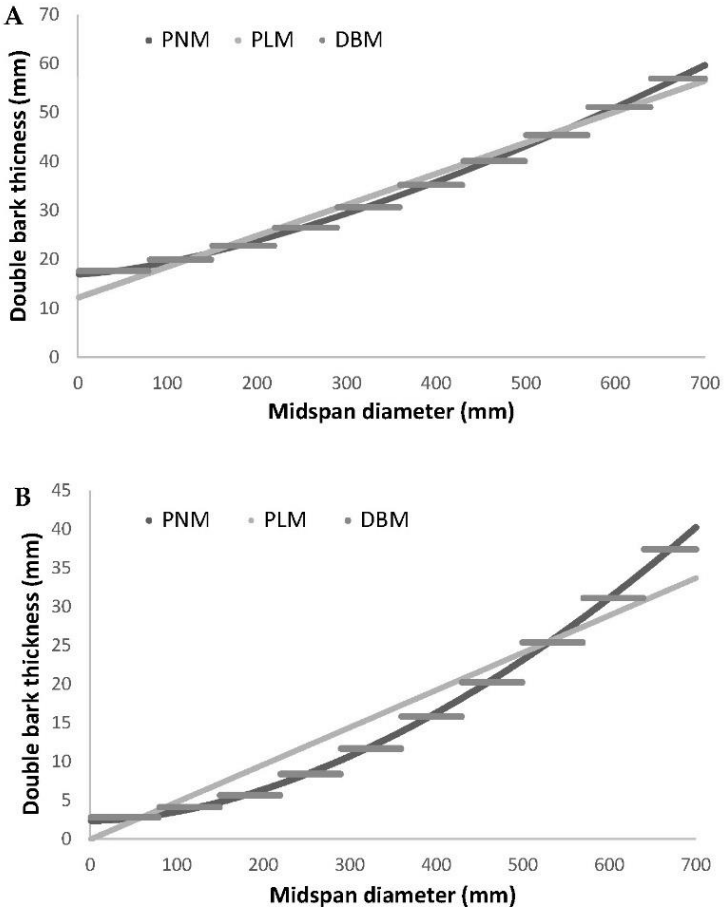


Figure 2. Comparison of double bark thickness curves using three various bark deduction methods (PNM, PLM, DBM) for Scots pine butt logs with rough bark (**A**) and for Scots pine logs with normal bark thickness (**B**).

Subsequently, we estimated the under-bark volume (m^3) for each log using these three bark deduction methods (DBM, PLM, PNM). To estimate the under-bark volumes, only the M3toDE price category was used throughout this study as recommended by Natov and Dvořák [30] for harvesters in Czechia. Therefore, Equation (1) was used again. However, in this case, the value of midspan diameter (MD; cm) used in Equation (1) was the value obtained by subtracting the double bark thickness (DBT, mm) from the measured midspan diameter (MD, mm over bark), rounded down to the nearest centimeter. By substituting the calculated under-bark midspan diameter (cm) into the formula, the under-bark volume (m^3) was estimated. The under-bark volumes estimated according to these three different bark deduction methods were identified as V_{DBM}, V_{PLM}, and V_{PNM}.

The log cut first from each stem was identified as the butt log. Butt logs were assumed to have rough bark, and therefore the under-bark volume estimates were simulated using parameters for Scots pine butt logs with rough bark. For the remaining logs (from the second to the last log), where rough bark was not expected, the under-bark volume estimates were simulated using parameters for Scots pine logs with normal bark thickness.

2.4. Data Analyses

Statistical analyses were performed in the statistical software R [37]. Descriptive statistics were used to obtain average and summary values of individual variables. Data normality was always tested using the Kolmogorov–Smirnov normality test. Paired Wilcoxon rank-sum tests were used to test the differences between over-bark volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories in individual assortment grades and required length categories. Friedman's ANOVA was used to test the differences between the M3toDE under-bark volume estimates using the DBM, PLM and PNM bark deduction methods. The Nemény post-hoc test, followed by the Bonferroni method for p-value correction, was used for multiple comparisons. A significance level of $\alpha = 5\%$ was chosen for all statistical tests.

3. Results

Overall, 4661 Scots pine stems were processed into 29,834 logs by the machine. The logs were measured by the machine and two different algorithms of the M3s and M3toDE price categories were used for over-bark volume estimation (Table 3). The total over-bark volume of all logs estimated by the M3s price category was higher than that estimated by the M3toDE price category. This was also true for the total over-bark volume of the logs in each assortment grade (Table 3).

Table 3. Measured Scots pine timber parameters and estimated over-bark volumes of logs according to the M3s and M3toDE price categories.

Parameter of Logs	All Logs	Assortment Grade		
		Roundwood	Pulpwood	Firewood
	n = 29,834	n = 12,276	n = 14,751	n = 2807
Mean TL (cm)	259 (SD = 85)	344 (66)	203 (2)	180 (66)
Mean RL (cm)	252 (81)	332 (65)	200 (0)	180 (66)
Mean MD (mm o.b.)	209 (78)	261 (62)	181 (64)	128 (55)
Mean TD (mm o.b.)	198 (77)	250 (59)	169 (64)	118 (56)
Total V_{M3s} (m^3 o.b.)	3444.18	2525.89	843.98	74.31
Total V_{M3toDE} (m^3 o.b.)	3220.94	2335.43	814.77	70.75
RD (%)	−6.48	−7.54	−3.46	−5.80

Notes: o.b.—over bark, SD—standard deviation, n—number of logs, TL—total length, RL—required length, MD—midspan diameter, TD—top end diameter, V_{M3s}—log over-bark volume estimate according to the M3s price category [32], V_{M3toDE}—log over-bark volume estimate according to the M3toDE price category [32], RD—relative difference between the total over-bark volume of logs estimated according to the M3s price category and the total over-bark volume estimated according to the M3toDE price category.

A significant difference was found between mean over-bark log volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories (V = 406,897,487, $p < 0.001$), as Figure 3 shows. Significant differences between mean over-bark log volumes were also found in individual assortment grades—in the roundwood (V = 75,194,338, $p < 0.001$), pulpwood (V = 86,078,798, $p < 0.001$) and firewood (V = 2,645,658, $p < 0.001$), as Figure 4 shows.

Significant differences between mean over-bark log volumes were also found in each required length category of logs—in the 0–100 cm (V = 36,568, $p = 0.01$), in the 101–200 cm (V = 102,461,502, $p < 0.001$), in the 201–300 cm (V = 25,761,921, $p < 0.001$), and in the 301–400 cm (V = 17,624,249, $p < 0.001$) categories, as Figure 5 shows.

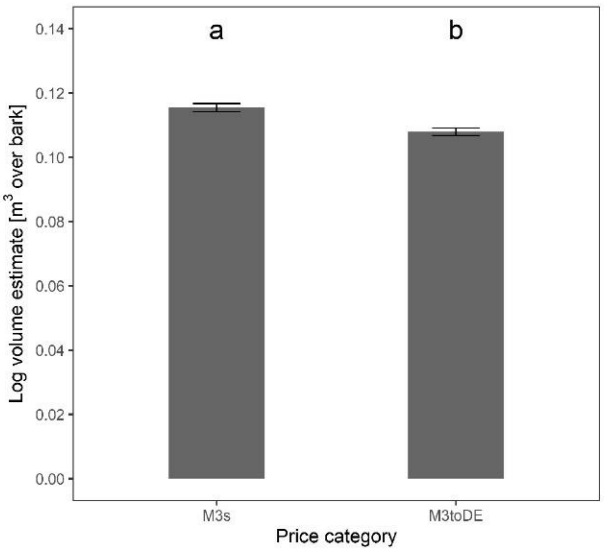


Figure 3. Differences between mean over-bark volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories, regardless of Scots pine log assortment grade. The different letters (a, b) indicate statistically significant differences revealed by the paired Wilcoxon rank-sum test ($\alpha = 5\%$), error bars indicate a 95% confidence interval.

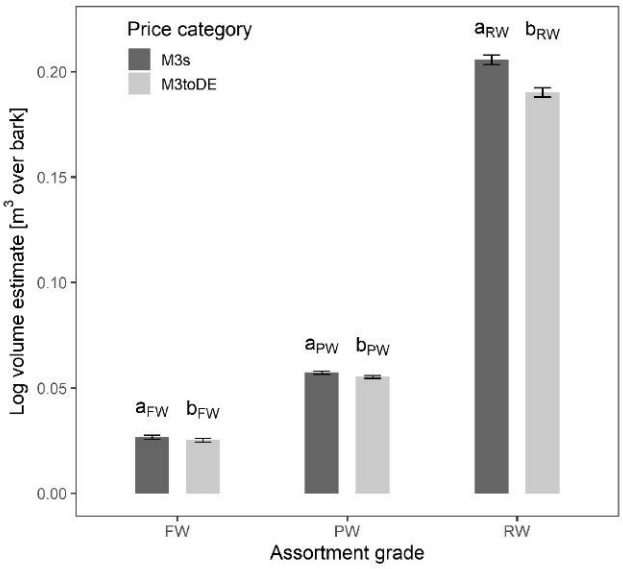


Figure 4. Differences between mean over-bark volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories in individual assortment grades of logs. The different letters (a, b) indicate statistically significant differences revealed by the paired Wilcoxon rank-sum test ($\alpha = 5\%$) for each grade separately. Assortment grades are distinguished by text indices (RW, PW, FW), the error bars indicate a 95% confidence interval.

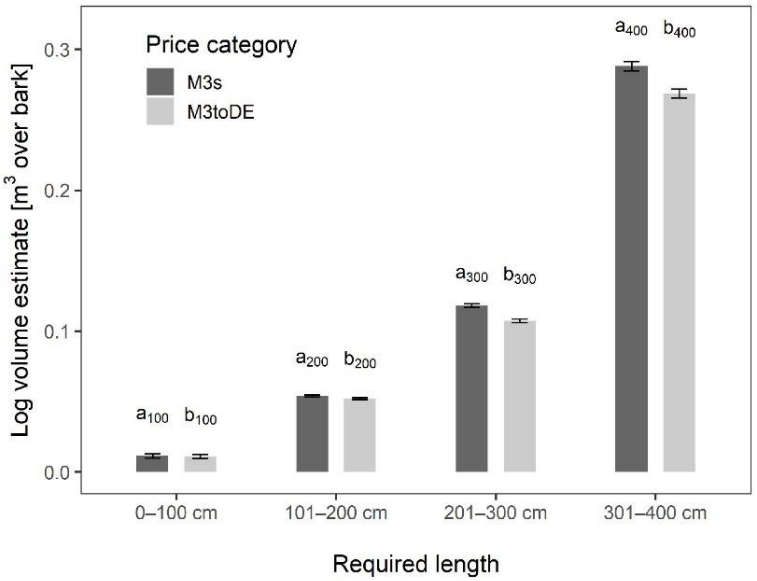


Figure 5. Differences between mean over-bark volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories in individual required length categories of logs. The different letters (a, b) indicate statistically significant differences revealed by the paired Wilcoxon rank-sum test ($\alpha = 5\%$) for each grade separately. Required length categories are distinguished by indices (100, 200, 300, 400), the error bars indicate a 95% confidence interval.

After separating butt logs from other logs, double bark thickness was determined for each log in both groups according to the DBM, PLM, and PNM bark deduction methods. These values were then used individually to estimate under-bark volumes of the log according to the M3toDE price category (Table 4). The mean required length of butt logs was 292 cm and their mean midspan diameter was 267 mm. In contrast, the mean required length of other logs was 245 cm and their mean midspan diameter was 196 mm. In the butt log group, bark accounted for 175.58 m^3 (18.91%) of the total volume when using the DBM. Linear modelling (the PLM) yielded a difference between over- and under-bark volume of 185.93 m^3 (20.03%) and the PNM yielded a difference 177.32 m^3 (19.10%). In the other log group, bark accounted for 165.30 m^3 (7.21%) of the total volume when using the DBM. The PLM yielded a difference between over- and under-bark volume of 231.97 m^3 (10.12%) and the PNM yielded a difference 167.32 m^3 (7.30%).

We found a significant difference between the under-bark volumes estimated through the selected bark deduction methods for butt logs (Friedman $\chi^2 = 1076.7$, df = 2, $p < 0.001$) and also for other logs (Friedman $\chi^2 = 13{,}710$, df = 2, $p < 0.001$). However, multiple comparisons revealed that the difference between under-bark volume estimates using the DBM and the PNM was not significant for butt logs ($p = 0.099$; Figure 6A), as well as for other logs ($p > 0.99$; Figure 6B).

Table 4. Measured Scots pine timber parameters and estimated under-bark volumes, using three different bark deduction methods (DBM, PLM, PNM), for butt logs with rough bark and other logs with normal bark thickness.

Parameter of Logs	Scots Pine (*Pinus sylvestris*)	
	Butt Logs (Rough Bark)	Logs (Normal Bark)
	n = 4661	n = 25,173
Mean V_{M3toDE} (m^3 o.b.)	0.199	0.091
Total V_{M3toDE} (m^3 o.b.)	928.266	2292.675
Mean DBT_{DBM} (mm)	28.2	6.7
Mean DBT_{PLM} (mm)	29.7	9.5
Mean DBT_{PNM} (mm)	28.4	6.7
Total V_{DBM} (m^3 u.b.)	752.686	2127.379
Total V_{PLM} (m^3 u.b.)	742.334	2060.705
Total V_{PNM} (m^3 u.b.)	750.945	2125.359

Notes: o.b.—over bark, n—number of logs, V_{M3toDE}—log over-bark volume estimate according to the M3toDE price category, DBT_{DBM}—double bark thickness according to the diameter band bark deduction method, DBT_{PLM}—double bark thickness according to the parametric linear bark deduction method, DBT_{PNM}—double bark thickness according to the parametric nonlinear bark deduction method, V_{DBM}—log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the diameter band bark deduction method, V_{PLM}—log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the parametric linear bark deduction method, V_{PNM}—log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the parametric nonlinear bark deduction method.

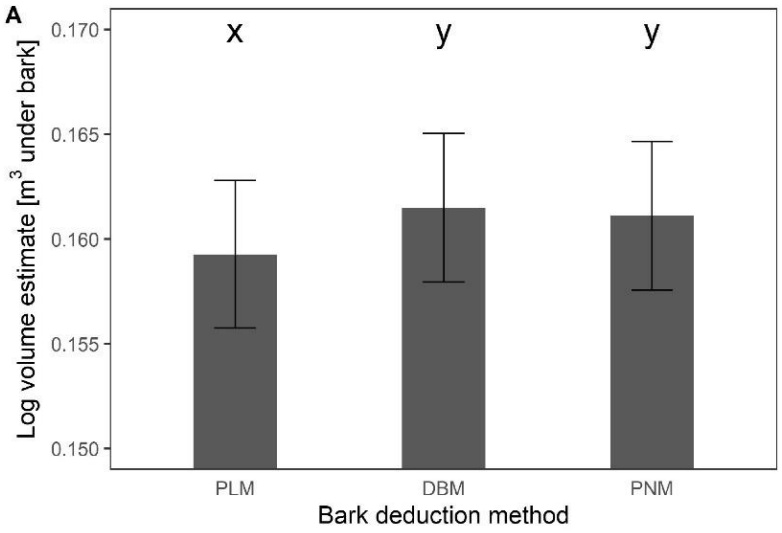


Figure 6. *Cont.*

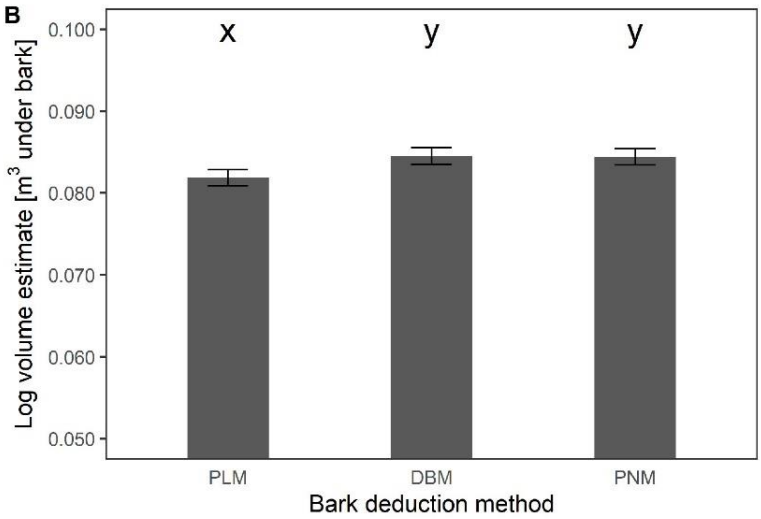


Figure 6. Differences between mean under-bark volumes of (**A**) Scots pine butt logs with rough bark and (**B**) Scots pine logs with normal bark thickness, estimated according to the M3toDE price category using selected bark deduction methods: PLM—Parametric linear bark deduction method [30], DBM—Diameter band bark deduction method [30], PNM—Parametric nonlinear bark deduction method [23]. The different letters (x, y) indicate significant differences revealed by the Neményi post-hoc test with Bonferroni *p*-value correction ($\alpha = 5\%$), the error bars indicate a 95% confidence interval.

4. Discussion

The total over-bark volume of all produced Scots pine logs estimated according to the M3s price category was 6.48% higher than the total volume estimated by the M3toDE price category. A significant difference was also found for the mean over-bark log volumes estimated through the two price categories, both for all logs and particular assortment grades. Löwe et al. [15] found similar results in a study of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst) logs, where the results revealed that the difference between the total volumes of these two price categories was 5.67% and significant for the roundwood, pulpwood, and firewood grades. The relative differences found between the total volume estimated by the M3s and M3toDe price categories in this study and in the study conducted by Löwe et al. [15] could be caused by the tree species that was studied. The measured parameters of each tree species can be affected by thickness and structure of the bark, surface and tapering of the stem, branching density, etc. The midspan diameter and required length distributions of studied logs can also have some effect on the relative difference between total volumes. Our results revealed significant differences between mean over-bark volumes estimated by the M3s and M3toDe price categories, regardless of the log required length.

However, based on the specific historical development of forestry in Czechia, the volume of timber is typically estimated using the Huber formula [21] and from the log midspan diameter rounded down to the closest centimeter [28]. This is despite the fact that it has been proven that the determination of volume according to the Huber method underestimates the volume for geometric shapes, such as cone and neoloid, compared to the volume estimate by the Newton section method [16]. Therefore, unless the overall approach to volume estimate in Czechia changes, the M3toDE or M3miDE price categories (which use the same algorithm for volume estimation) need to be used in the control and information systems of harvesters to comply the national standards and ensure records compatibility.

To estimate under-bark volumes of Scots pine logs produced by harvesters comparable to the under-bark volume estimates according to Wojnar [23], the DBM should be used rather than the PLM bark deduction method proposed by Natov and Dvořák [30]. There was no significant difference

between the mean under-bark volumes estimated by the DBM and the PNM; this result was found both for butt logs and other logs.

However, it is important to note that the compared existing double bark thickness estimation methods are based on dated material (the CCT were compiled in the 1970s). This is important, because, e.g., Stängle and Dormann [38] and Stängle et al. [39], found that bark generation by trees has decreased in Germany in a similar time frame. Therefore, perhaps the underlying data set should be evaluated for validity.

For butt logs, we found that the difference between over-bark and under-bark M3toDE volumes was the largest when using the PLM and smallest when using the DBM. Although there was a statistically significant difference between the PLM and the PNM, the relative difference between these methods was only 0.93% of the total over-bark volume. In comparison with other Scots pine logs with normal bark, the difference between over-bark and under-bark volumes was also the largest when using the PLM and smallest when using the DBM, while the relative difference between the PLM and the PNM was significantly higher and reached 2.82%. According to other studies, bark can account for 6% to 20% of the total log volume [40–42]. Liepiņš and Liepiņš [43] found that the average bark proportion in Scots pine stem varies from 5.5% to 34.5%. These variations can be explained mainly by the effect of tree age or its size. Bark thickness is also affected by the climatic zone, stem form, site quality, latitude of forest stands, and other aspects [44–46]. Several bark variations of Scots pine also exist [47].

When using the DBM and the PLM, different parameters are applied for butt logs with rough bark and other logs with "normal" bark thickness. In this study, these methods were applied to individual logs to demonstrate the differences in bark thickness. However, in practice, after cutting a tree, the harvester operator must decide whether to choose a bark deduction for rough bark or for normal bark thickness and, then, this type is used for all logs produced from the stem. The control and information system of harvesters does not allow the selection of parameters for bark deduction for each log.

To obtain reliable outputs from harvesters, regular control measurements of harvester measuring systems and, if necessary, calibration of the harvester, have to be performed [15]. If the settings of individual timber production parameters of the control and information systems are understood and regular control measurements of the accuracy of the measuring systems are performed, output estimates of timber production comparable to those based on other measurement methods, e.g., manual scaling or timber scanning, can be obtained [23].

5. Conclusions

In this study, we found that recording the over-bark volume of Scots pine logs through the M3toDE price category resulted in its significant underestimation, compared to the reference M3s price category. This would result in smaller revenues of foresters who use this price category to market their timber. On average, about one-fifth of the butt log volume consisted of bark, whereas bark accounted for less than 10% of the volume of other logs. The differences between the two studied double bark thickness deduction methods and the reference PNM showed that only linear modelling (the PLM) provided significantly different results, while differences between PNM and DBM were insignificant. Based on these results, we strongly recommend using the DBM if harvester outputs are to be compared with the GTS results that use the PNM.

Because setting PLM parameters is simpler and saves time compared to setting individual DBM values, the PLM can still be considered when using parameters for butt logs with rough bark. In this case, statistically significant differences between the PLM and the PNM were also found, however, the overall difference was smaller than 1%. On the other hand, this would complicate comparison with manual measurement records. For other logs, with normal bark thickness, we strongly recommend not using the PLM. In order to support these results, it would be appropriate to carry out a similar experiment on a larger dataset from different harvesters. It would also be useful to carry out other

studies to verify the differences between bark deduction methods recommended by the GEH for other tree species in Czechia.

Author Contributions: Conceptualization, P.N.; Data Curation, M.S.; Formal Analysis, M.S., R.L. (Radim Löwe) and M.J.; Funding Acquisition, M.S. and R.L. (Radim Löwe); Investigation, M.S. and R.L. (Radim Löwe); Methodology, M.S., R.L. (Radim Löwe), M.J., and P.N.; Project Administration, M.S. and R.L. (Radim Löwe); Resources, M.S., R.L. (Radim Löwe), M.J., and R.L. (Rostislav Linda); Software, P.N.; Supervision, J.D.; Validation, J.D.; Writing—Original Draft, R.L. (Radim Löwe) and M.S.; Writing—Review & Editing, M.S., R.L. (Radim Löwe), M.J., P.N., and R.L. (Rostislav Linda). All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the National Agency for Agricultural Research Czech Republic under the project no. QJ1520005: "Optimization of cut-to-length logging and grading of harvester-processed timber and proposed control procedures of timber volume measurements accuracy with the objective to enhance the production function of forests and maintain stand stability with respect to harmful agents" and by the Ministry of Education, Youth and Sports Czech Republic under the project MOBILITY 8J20PL062: "Analysis of the Impact of Harvester Technology on Forest Ecosystem depending on Work Performance".

Acknowledgments: We would like to thank the private forest company that allowed us to collect data from its harvester.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Pulkki, R. Cut-to-length, tree-length or full tree harvesting? *Cent. Woodl.* **1997**, *1*, 22–27.
2. Malinen, J.; Kilpeläinen, H.; Wall, T.; Verkasalo, E. Variation in the value recovery when bucking to alternative timber assortments and log dimensions. *For. Stud.* **2006**, *45*, 89–100.
3. Zinkevičius, R.; Steponavičius, D.; Vitunskas, D.; Činga, G. Comparison of harvester and motor-manual logging in intermediate cuttings of deciduous stands. *Turk. J. Agric. For.* **2012**, *36*, 591–600. [CrossRef]
4. Spinelli, R.; Lombardini, C.; Magagnotti, N. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fenn.* **2014**, *48*, 1–15. [CrossRef]
5. Mederski, P.S.; Bembenek, M.; Karaszewski, Z.; Lacka, A.; Szczepanska-Álvarez, A.; Rosinska, M. Estimating and modelling harvester productivity in pine stands of different ages, densities and thinning intensities. *Croat. J. For. Eng.* **2016**, *37*, 27–36.
6. Soman, H.; Kizha, A.R.; Munoz, B.; Kenefic, L.; Kanoti, K. Production Economics: Comparing Hybrid Tree-Length with Whole-Tree Harvesting Method. *Int. J. For. Res.* **2020**, *93*, 389–400. [CrossRef]
7. Gellerstedt, S.; Dahlin, B. Cut-to-length: The next decade. *Int. J. For. Eng.* **1999**, *10*, 17–25.
8. Lundbäck, M.; Häggström, C.; Nordfjell, T. Worldwide Trends in the Methods and Systems for Harvesting, Extraction and Transportation of Roundwood. In Proceedings of the 6th International Forest Engineering Conference "Quenching our thirst for new Knowledge", Rotorua, New Zealand, 16–19 April 2018; pp. 1–3.
9. Ferrari, E.; Spinelli, R.; Cavallo, E.; Magagnotti, N. Attitudes towards mechanized cut-to-length technology among logging contractors in Northern Italy. *Scand. J.* **2012**, *27*, 800–806. [CrossRef]
10. Louis, L.T.; Kizha, A.R. Calculating the cost of integrated harvesting of small-diameter trees dominated stand using various apportioning methods. In Proceedings of the 52nd International Symposium on Forestry Mechanization, "Exceeding the Vision: Forest Mechanization of the Future", Sopron, Hungary, 6–9 October 2019; pp. 613–622.
11. Moskalik, T.; Borz, S.A.; Dvořák, J.; Ferenčík, M.; Glushkov, S.; Muiste, P.; Lazdiņš, A.; Styranivsky, O. Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: A Review. *Croat. J. For. Eng.* **2017**, *38*, 231–241.
12. Dvořák, J.; Chytrý, M.; Natov, P.; Jankovský, M.; Beljan, K. Long-term Cost Analysis of Mid-performance Harvesters in Czech Conditions. *Austrian J. For. Sci.* **2019**, *136*, 351–372.
13. MZe. *Zpráva o Stavu Lesa a Lesního Hospodářství České Republiky v Roce 2018*; Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2019; 110p, ISBN 978-80-7434-530-2.
14. Dvořák, J.; Bystrický, R.; Hošková, P.; Hrib, M.; Jarkovská, M.; Kováč, J.; Krilek, J.; Natov, P.; Natovová, L. *The Use of Harvester Technology in Production Forests*, 1st ed.; Lesnická Práce s.r.o.: Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic, 2011; 156p, ISBN 978-80-7458-018-5.
15. Löwe, R.; Sedmíková, M.; Natov, P.; Jankovský, M.; Hejcmanová, P.; Dvořák, J. Differences in Timber Volume Estimates Using Various Algorithms Available in the Control and Information Systems of Harvesters. *Forests* **2019**, *10*, 388. [CrossRef]

16. León, G.C.; Uranga-Valencia, L.P. heoretical Evolution of Huber and Smalian Methods Applied to Tree Stem Classical Geometries. *Bosque* **2013**, *34*, 311–317. [CrossRef]
17. Diéguez-Aranda, U.; Barrio-Anta, F.; Castedo-Dorado, F.; Ruíz-González, A.D.; Álvarez-Taboada, M.F.; Álvarez-González, J.G.; Rojo-Albareca, A. *Dendrometría*; Mundi-Prensa: Madrid, Spain, 2003; 327p.
18. Avery, T.E.; Burkhart, H.E. *Forest Measurements*; Mc Graw Hill: New York, NY, USA, 2002; 456p.
19. Van Laar, A.; Akça, A. *Forest Mensuration*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2007; 383p.
20. West, P.W. *Tree and Forest Measurement*; Springer: Berlin, Germany, 2004; 167p.
21. Graves, H.S. *Forest Mensuration*; John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 1906; 458p.
22. Husch, B.; Beers, T.W.; Kershaw, J.A., Jr. *Forest Mensuration*, 4th ed.; John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 2003; 443p, ISBN 978-0-471-01850-6.
23. Wojnar, T. *Doporučená Pravidla pro Měření a Třídění Dříví v ČR 2008*, 2nd ed.; Lesnická Práce s.r.o.: Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic, 2007; 147p, ISBN 978-80-87154-01-4.
24. Giedrowicz, A.; Staniszewski, P. Accuracy of selected methods of the determination of Scots pine logs volume. *Sylwan* **2017**, *161*, 892–897. [CrossRef]
25. Polkowski, K.; Zarzyński, P.; Tomusiak, R. Accuracy of methods to determine under bark volume of logs according to the PN−D−95000:2002 standard—A case study of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) from the Płaska Forest District. *Sylwan* **2019**, *163*, 460–468. [CrossRef]
26. Lindblad, J. *Puutavaran Mittaus (Timber Measurement)*; Tapion Taskukirja, Research and Development Center Tapio: Tapio, Finland, 2008.
27. Miklaševičs, Z. The analysis of coniferous logs top diameter measurement accuracy using harvester and 3D systems. *Bull. Transilv. Univ. Braşov* **2017**, *10*, 35–42.
28. Jankovský, M.; Natov, P.; Dvořák, J.; Szala, L. Norway spruce bark thickness models based on log midspan diameter for use in mechanized forest harvesting in Czechia. *Scand. J.* **2019**, *34*, 617–626. [CrossRef]
29. ČSN. *Standard n. 48 0009: Tabulky Objemu Kulatiny bez Kůry Podle Středové Tloušťky Měřené v kůře (Tables of Roundwood Inside Bark Volume According to Midspan Diameter Measured over Bark)*; ČSN: Prague, Czech Republic, 1977; 592p.
30. Natov, P.; Dvořák, J. *Doporučená Pravidla pro Elektronický Příjem Dříví Harvestory v ČR 2018*; Produkce BPP s.r.o.: Litomyšl, Czech Republic, 2018; 136p, ISBN 978-80-906874-7-9.
31. Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. Project StanForD Classic Documents—Last Update 18 April 2012. Available online: https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/ (accessed on 12 December 2019).
32. Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. *Appendix- Standard for Forest Data and Communications: Definitions of Variables—General and Country Specific*. 18 April 2012. Available online: https://www.skogforsk.se/cd_20190114161714/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/appendix1_eng_120418.pdf (accessed on 14 December 2019).
33. *BW-HKS, Gesetzliche Handelsklassensortierung für Rohholz (Forst-HKS) mit Ergänzungsbestimmungen für BadenWürttemberg*; Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Stuttgart, Germany, 1983; 25p.
34. Neruda, J.; Valenta, J. Factors of the efficiency of harvesters and forwarders in logging. In Proceedings of the Austro2003 Symposium. High Tech Forest Operations for Mountainous Terrain, Schlägl, Austria, 5–9 October 2003; pp. 1–11.
35. Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. *Standard for Forest Data and Communications*. 27 March 2007. Available online: https://www.skogforsk.se/cd_20190114161714/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/stanford_maindoc_070327.pdf (accessed on 12 December 2019).
36. MZe. *Zpráva o Stavu Lesa a Lesního Hospodářství České Republiky v Roce 2013*; Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2014; 134p, ISBN 978-80-7434-153-3.
37. R Core Team. *R: A language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2019; Available online: https://www.R-project.org/ (accessed on 10 December 2019).
38. Stängle, S.M.; Dormann, C.F. Modelling the variation of bark thickness within and between European silver fir (*Abies alba* Mill.) trees in southwest Germany. *Forestry* **2018**, *91*, 283–294. [CrossRef]
39. Stängle, S.M.; Sauter, U.H.; Dormann, C.F. Comparison of models for estimating bark thickness of Picea abies in southwest Germany: The role of tree, stand, and environmental factors. *Ann. For. Sci.* **2017**, *74*, 1–10. [CrossRef]

40. Heath, L.S.; Hansen, M.; Smith, J.E.; Miles, P.D.; Smith, B.W. Investigation into calculating tree biomass and carbon in the FIADB using a biomass expansion factor approach. In *Forest Inventory and Analysis (FIA) Symposium 2008, Park City, UT. Proceedings RMRS-P-56CD*; McWilliams, W., Moisen, G., Czaplewski, R., Eds.; US Forest Service Rocky Mountain Research Station: Fort Collins, CO, USA, 2009; 24p.
41. Cellini, J.M.; Galarza, M.; Burns, S.L.; Martinez-Pastur, G.J.; Lencinas, M.V. Equations of bark thickness and volume profiles at different heights with easy-measurement variables. *For. Syst.* **2012**, *21*, 23–30. [CrossRef]
42. Wehenkel, C.; Cruz-Cobos, F.; Carrillo, A.; Lujan-Soto, J.E. Estimating bark volumes for 16 native tree species on the Sierra Madre Occidental, Mexico. *Scand. J.* **2012**, *27*, 578–585. [CrossRef]
43. Liepiņš, J.; Liepiņš, K. Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia. In Proceedings of the Research for Rural Development–International Scientific Conference, Jelgava, Latvia, 13–15 May 2015; Volume 2, pp. 22–28.
44. Wilhelmsson, L.; Arlinger, J.; Spångberg, K.; Lundqvist, S.O.; Grahn, T.; Hedenberg, Ö.; Olsson, L. Models for Predicting Wood Properties in Stems of Picea abies and Pinus sylvestris in Sweden. *Scand. J.* **2002**, *17*, 330–350. [CrossRef]
45. Sonmez, T.; Keles, S.; Tilki, F. Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of Picea orientalis. *Scand. J.* **2007**, *22*, 193–197. [CrossRef]
46. Laasasenaho, J.; Melkas, T.; Aldén, S. Modelling bark thickness of *Picea abies* with taper curves. *For. Ecol. Manag.* **2005**, *206*, 35–47. [CrossRef]
47. Jelonek, T.; Pazdrowski, W.; Arasimowicz-Jelonek, M.; Gzyl, J.; Tomczak, A.; Floryszak-Wieczorek, J. The relationship between the form of dead bark and lignin content in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Turk. J. Agric. For.* **2009**, *33*, 455–462. [CrossRef]

© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

5.2 Stanovení objemu modřínového dříví s kůrou a bez kůry vyrobeného harvestory

Originální název: Over- and under-bark volume estimation of European larch timber produced by mechanized harvesting in Czechia

Löwe, M.; Löwe, R.; Jankovský, M.; Natov, P.; Dvořák, J. Over- and under-bark volume estimation of European larch timber produced by mechanized harvesting in Czechia. *Journal of Forest Science* 2024, 70(7):381-390, https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

Cílem této studie bylo analyzovat stanovení objemů dříví modřínu evropského vyrobeného harvestorem v České republice s kůrou a bez kůry. Celkem bylo analyzováno 637 kmenů, ze kterých bylo vyrobeno 4 345 výřezů. Pro stanovení objemu nabízí standard StanForD několik typů cen s různými algoritmy. V této studii byl použit typ ceny M3s, který je založen na stanovení dílčích objemů deseticentimetrových úseků, které se sečtou. Tento objem byl porovnán s typem ceny M3toDE, který stanovil objem na základě Huberova vzorce s použitím střední tloušťky zaokrouhlené dolů na nejbližší celý centimetr. Typ ceny M3toDE podhodnotil objem s kůrou o 5,59 % oproti typu ceny M3s. Pro použití v lesnické praxi v ČR je však vzhledem ke standardizovaným postupům měření dříví na základě Huberova vzorce v současnosti nutné používat typ ceny M3toDE. Proto byl typ ceny M3toDE použit k porovnání podkorních objemů podle různých metod odpočtu kůry. Mezi všemi pěti zkoumanými metodami byly nalezeny rozdíly. Objemy stanovené metodou pásmových odpočtů a parametrickou lineární metodou odpočtu kůry, které je možné použít v harvestorech, však oproti Valentově metodě dosahují nízkých rozdílů, 0,25 %, resp. 0,66 %. Oproti tomu Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v ČR (Wojnar, 2007) a Tabulky a polynomy pro výpočet objemu kulatiny bez kůry (Černý a Pařez, 2002), které se v současné době v českém lesnictví používají pro stanovení objemu jednotlivých kmenů, podhodnocují o 6,6 % (rozdíl Valentovy metody oproti Doporučeným pravidlům od Wojnara) a nadhodnocují o 6,3 % (rozdíl Valentovy metody oproti Tabulkám a polynomům od Černého a Pařeza). Je to dáno použitím hodnot z tabulek pro odpočet kůry borovice lesní, nikoli přímo modřínu evropského.

Pochopení této dílčí problematiky pomůže při zaškolení obsluhy, získání komplexních znalostí o fungování softwaru harvestoru a maximalizaci ekonomického efektu při prodeji modřínového dříví.

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

Over- and under-bark volume estimation of European larch timber produced by mechanised harvesting in Czechia

Monika Löwe, Radim Löwe, Martin Jankovský, Pavel Natov, Jiří Dvořák*

Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Prague, Czech Republic

**Corresponding author: lowem@fld.czu.cz*

Citation: Löwe M., Löwe R., Jankovský M., Natov P., Dvořák J. (2024): Over- and under-bark volume estimation of European larch timber produced by mechanised harvesting in Czechia. J. For. Sci.

Abstract: In Czechia, harvesters contributed 43% of the total annual timber production in 2022. It is assumed that harvester technology will continue to be used intensively in the future, even though there is a change in the tree species composition of forests after the recent bark beetle outbreak and an increase in the use of close-to-nature forest management. The aim of this study was to analyse the over- and under-bark volume estimates of European larch timber produced by a harvester in Czechia. This study used the M3s price category for volume estimation. This volume was compared with the M3toDE price category. The M3toDE price category underestimated the over-bark volume by 5.59% compared to the M3s price category. However, for use in forestry practice in Czechia it is currently necessary to use the M3toDE price category. Therefore, the M3toDE price category was used to compare under-bark volumes according to different bark deduction methods. Differences were found between all the five methods investigated. Understanding this sub-issue will help in training operators, acquiring comprehensive knowledge about the functioning of harvester software and maximising the economic effect of the sale of larch timber.

Keywords: bark deduction methods; cut-to-length method; double bark thickness; *Larix decidua*; price categories; StanForD

In recent years, we have seen a dynamic growth in the use of the harvester technology (cut-to-length method; CTL) for felling in Europe (Moskalik et al. 2017). Mechanised harvesting increases productivity and reduces production costs compared to motor-manual felling (Zinkevičius et al. 2012; Spinelli et al. 2014). The increase in the representation of this technology in the total timber felling was also helped by the bark beetle outbreaks in the spruce forests. The CTL method is almost exclusively used for harvesting in some European countries, such as Finland, Sweden, Norway and Estonia (Gellerstedt, Dahlin 1999; Moskalik et al. 2017; Lundbäck et al. 2018). However, this does not apply in all European countries, there are also some barriers to increasing the share of CTL harvesting, such as the large capital expenses needed to purchase the machinery, terrain configuration or species composition in a region (Ferrari et al. 2012). Therefore, a low level of mechanisation of timber harvesting is, for example, in Bulgaria, Romania, Slovakia, and Ukraine (Moskalik et al. 2017). In Czechia, the share of timber produced by harvesters has increased in the last decade and reached 45% in 2022 (MoA 2023).

© The authors. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0).

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

The harvester technology is optimised for felling mainly in coniferous stands. Out of deciduous tree species, only stands with beech and birch to the age of 50 are considered (Dvořák et al. 2011). Other tree species are, from a technological point of view, problematic for processing. However, even this sector is being innovated and the possibilities of harvester technology are developing. Harvester heads are being modified, which enable debarking or, for example, processing of other types of wood, such as oak (Mederski et al. 2018). European larch (*Larix decidua* Mill.), a coniferous tree suitable for processing by harvesters, belongs to the tree species with a lower representation in the Czech forests. According to data for 2022 (MoA 2023), it was found on an area of over 102 000 ha of forest land, which represented 3.9% of the tree species composition of Czech forests. It is thus the third most represented conifer, after spruce (46.8%) and pine (16.0%). Current studies have shown that it is a geographically indigenous tree species in the territory of Czechia (Pokorný et al. 2023). In the past, however, it was never significantly represented in Czech forests. The reason was also its ecological demands, when it can be considered a light-demanding tree (Bottero et al. 2013), i.e. competitively weak in dense deciduous stands. There is currently no reason not to use this tree species in economic forests. Larch is mainly used for growing mixed stands in the form of individual and group-like mixtures. It helps foresters to increase the tree species diversity of forests. In 2022, the larch was used during the artificial restoration of forests after the bark beetle outbreak on a total area of almost 2 000 ha, which represented 5% of the total annual artificially afforested area (MoA 2023). According to the recommended tree species composition (MoA 2023), the representation of larch in Czech forests should increase to 4.2% in the future. And since larch often forms an admixture of spruce and pine stands, it can be assumed that larch timber will probably occur in higher volumes than today in timber production by harvester technology.

In Central Europe, timber dimensions are measured in bark but sold (volume is calculated) without bark. The bark volume is therefore provided to customers free of charge, and they can continue to use it and profit from it (Jankovský et al. 2023). The standard method of scaling timber in Czechia is to estimate the volume of logs using Huber's formula according to the log length and the midspan diameter measured in the bark with the application of a model deduction for the double bark thickness, as described in the Guidelines. However, larch is not the main economic tree, therefore it has not been given too much attention. The standard tables used for estimating the volume of logs, which are the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (GTS; Wojnar 2007) and Tables and Polynomials for Estimating Under-bark Volume of Logs (TP; Černý, Pařez 2002), use the same procedures for determining the double bark thickness for European larch as for Scots pine. Valenta (2015) compiled an equation for determining double bark thickness directly for larch. From this equation, Natov and Dvořák (2018) derived the values for the diameter band bark deduction method (DBM) and the parametric linear bark deduction method (PLM), which they present in the Guidelines for Electronic Scaling of Timber for Harvesters in Czechia (Natov, Dvořák 2018). The harvester software also offers several options for estimating the over-bark volume of produced logs, the so-called price categories, which are based on different algorithms. However, there is only one method (M3toDE) among them, whose algorithm coincides with how timber is traded in Czechia, according to the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (Wojnar 2007).

The aim of this study was to find out how the estimated over-bark volumes of larch timber produced by harvesters differ when using different price categories (sectional, very accurate volume M3s *vs.* volume based on the Huber M3toDE formula), and even between different produced assortments. Furthermore, the goal was to analyse the differences between the under-bark volumes of larch timber estimated according to the two bark deduction methods, which can be used in the harvester software, and three other bark deduction methods, which are standardly used in Czech forestry when estimating the under-bark volumes of larch logs.

MATERIAL AND METHODS

Data collection. The data utilised in this study were collected from a John Deere 1270E harvester (Deere & Company, USA) that was equipped with a Waratah 480C harvester head (Waratah Forestry Equipment, Finland). This machine used the TimberMatic control and information system (Version 1.19, 2016), which allows the storage

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

of data in the unified StanForD Classic standard (Skogforsk 2024). John Deere 1270E harvester belongs to the mid-performance category, which is the most prevalent harvester class in Czechia (MoA 2023). Data collection lasted from March 2017 to June 2018, primarily focusing on final and salvage fellings conducted across Czechia. The harvester predominantly processed coniferous trees, mostly Norway spruce (*Picea abies*) and Scots pine (*Pinus sylvestris*). The dataset used in this study overlaps with that of Löwe et al. (2019) and Sedmíková et al. (2020); however only European larch data were utilised here.

The harvester's control and information system was configured to automatically generate stem files (.stm), which contained various metrics (e.g. length and diameter) for each processed tree (Skogforsk 2007). Each stem of larch was automatically cut into 1–12 logs according to the assortment categorisation setting, with measured diameters provided for every 10 cm of log length, along with M3s volume estimate for each log.

To ensure the accuracy of length and diameter measurements, a control measurement procedure was implemented at the onset of each workday. The Haglöf Digitech Professional II digital caliper (Haglöf Sweden AB, Sweden) equipped with Digitech Tape and Skalman software (Version 6.11, 2016) was used for it. The procedure of control measurement was previously described by Löwe et al. (2019) and Sedmíková et al. (2020).

Data processing. Data contained within the stem files was migrated into the MS Excel file format. This data conversion process was facilitated using the STeMa application developed by Natov in 2016 (Version 1.0, 2016). Following the conversion, the resulting database underwent a thorough screening to eliminate any outliers or extreme values. In total, 637 stem files were analysed, containing data from 4 345 produced logs.

The variables under consideration were as follows:

- Tree species (*TS*): This study exclusively focused on European larch.
- Assortment (*AS*): This variable contained details regarding the classification of the log into assortments based on specified customer requirements.
- Midspan diameter (*MD*): *MD* denoted the diameter of the log (measured in millimetres over bark) in the middle of its required length.
- Top end diameter (*TD*): *TD* represented the diameter of the log (measured in millimetres over bark) at the end of its required length, serving as one of the quantitative parameters for assortment classification.
- Required length (*RL*): *RL* denoted the minimum required length of the log (measured in centimetres) for a particular assortment.
- Total length (*TL*): *TL* contained the real length of the log (measured in centimetres).
- Over-bark volume of a log according to the M3s price category (V_{M3s}): V_{M3s} indicated the volume of the log (measured in cubic metres over bark) estimated using the required length of the log.

Using the M3toDE price category algorithm, we calculated the volume of each log (designated as V_{M3toDE}). This volume estimation is based on the required length and midspan diameter, measured in millimetres, and was rounded down to the nearest whole centimetre using the HKS method (Handelsklassensortierung – trade class sorting; BW-HKS 1983).

The log volume was estimated according to Equation (1):

$$V_{M3toDE} = \pi \times \frac{\frac{MD^2}{4}}{10\,000} \times \frac{RL}{100} \quad (1)$$

where:

V_{M3toDE} – log volume according to the M3toDE price category (m^3 over bark);
MD – midspan diameter (cm);
RL – required length (cm).

The principle of estimating volume according to the M3s and M3toDE price categories is described in detail and graphically illustrated in the study by Sedmíková et al. (2020).

Categorisation of assortments. The harvester produced logs that represented specific assortments. Each assortment met specific requirements of the customer, which included parameters such as tree species, top end diameter, required length, and grade. Upon felling a tree, the harvester operator initially identified the tree species and assessed the timber quality (grade). Subsequently, the machine software proposed to produce a suitable assortment based on predetermined quantitative parameters. This grading method was also used by Löwe et al. (2019).

Bark thickness deduction methods. In Czechia, the Guidelines for Electronic Scaling of Timber for

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

Harvesters in Czechia, GEH (Natov, Dvořák 2018) were developed. Therefore, to estimate the under-bark volume based on the M3toDE price category, two bark deduction methods, which are listed in GEH and are supported by the control and information system of harvesters, were used. It was the diameter band bark deduction method (DBM) and the parametric linear bark deduction method (PLM). Values and parameters of these bark deduction methods for larch were created in GEH based on the method reported by Valenta (2015). However, the bark deduction method developed by Valenta (2015) could not be used directly in GEH because polynomial functions are not supported in the StanForD.

For comparison, double bark thickness values were calculated commonly in Czechia for all logs according to the methods developed by Valenta (2015). We also added two more methods which are very common in Czechia. Their disadvantage is that they do not differentiate the double bark thickness estimation for European larch separately but use the same values as for Scots pine. These are the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (Wojnar 2007) and Tables and Polynomials for Estimating Underbark Volume of Logs (Černý, Pařez 2002).

Below are the individual bark deduction methods and their formulas, or the values that were used in the study.

(*i*) The diameter band bark deduction method (DBM method – usable in the software of harvesters). The double bark thickness values within the DBM were determined for 10 diameter bands published in GEH (Natov, Dvořák 2018) and are shown in Table 1.

(*ii*) The parametric linear bark deduction method (PLM method – usable in the software of harvesters), Equation (2):

$$DBT_{PLM} = a + MD \times b \quad (2)$$

where:

DBT_{PLM} – double bark thickness according to the PLM method (mm);

a, b – $a = 2.02$, $b = 0.0482$ for European larch logs according to the GEH (Natov, Dvořák 2018);

MD – midspan diameter (mm over bark).

(*iii*) The bark deduction method according to Valenta (VAL method – parametric nonlinear function, so it cannot be used in software of harvesters). Valenta (2015) distinguishes two formulas for determining double bark thickness, depending on whether it is a butt log or other logs from the tree trunk. However, since bark deduction methods in GEH (Natov, Dvořák 2018) were derived only from Valenta's formula for other logs, this study used the formula for other logs for comparison, as shown in Equation (3):

$$DBT_{VAL} = (0.55436 + 0.01734 \times MD^{1.29855}) \times 10 \quad (3)$$

where:

DBT_{VAL} – double bark thickness according to Valenta (2015) in mm;

MD – midspan diameter (cm over bark).

(*iv*) The bark deduction method according to the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (GTS – parametric nonlinear function, so it cannot be used in the software of harvesters). Since 2002, the Guidelines for Timber Scaling in Czechia (Wojnar 2007) have been used in the timber production and trade of individual assortments. The GTS fully govern a large number of contracts between suppliers and customers. However, for calculating double bark thickness of European larch, the same parameters are used as those that are set up for Scots pine butt logs, as shown in Equation (4):

Table 1. The double bark thickness values of the diameter band bark deduction method (DBM) used for under-bark volume estimation of European larch timber in harvester control and information systems

European larch (*Larix decidua*)	
Midspan diameter (mm over bark)	double bark thickness (DBT_{DBM}; mm)
0–79	6.71
80–149	9.43
150–219	12.86
220–289	16.86
290–359	21.14
360–429	25.71
430–499	30.57
500–569	35.57
570–639	40.86
640–700	46.43

DBT_{DBM} – double bark thickness according to the diameter band bark deduction method according to the guidelines by Natov and Dvořák (2018)

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

$$DBT_{GTS} = (1.7015 + 0.008762 \times MD^{1.4568}) \times 10 \quad (4)$$

where:

DBT_{GTS} – double bark thickness according to Wojnar (2007) in mm;

MD – midspan diameter (cm over bark).

(*v*) The bark deduction method according to the Tables and Polynomials for Estimating Under-bark Volume of Logs (TP – parametric nonlinear function, so it cannot be used in the control and information systems of harvesters). Tables and Polynomials for Estimating Under-bark Volume of Logs (Černý, Pařez 2002) use parametric nonlinear function with Scots pine parameters for under-bark volume estimation of European larch timber, as shown in Equation (5):

$$DBT_{TP} = (0.25017 + 0.0019147 \times MD^{1.7866}) \times 10 \quad (5)$$

where:

DBT_{TP} – double bark thickness according to the Tables and Polynomials for Estimating Under-bark Volume of Logs (Černý, Pařez 2002) in mm;

MD – midspan diameter (cm over bark).

Under-bark volume estimates. We estimated the under-bark volume (m^3) for each log using all five bark deduction methods (DBM, PLM, VAL, GTS, TP). To estimate the under-bark volumes, only the M3toDE price category was used throughout this study as recommended by Natov and Dvořák (2018). Therefore, Equation (1) was used. However, in this case, the value of midspan diameter (*MD*; cm) used in Equation (1) was the value obtained by subtracting the double bark thickness (*DBT*; mm) from the measured midspan diameter (*MD*; mm over bark), rounded down to the nearest centimetre. By substituting the determined under-bark midspan diameter (cm) into the formula, the under-bark volume (m^3) was calculated. The under-bark volumes, estimated via these five bark deduction methods, were denoted as V_{DBM}, V_{PLM}, V_{VAL}, V_{GTS}, and V_{TP}.

Data analyses. Descriptive statistics were used to obtain average and summary values of individual variables. The Kolmogorov-Smirnov normality test was used for testing of the data normality. Wilcoxon matched pairs test was used to test the differences between over-bark volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories. Friedman's analysis of variance (ANOVA) was used to test the differences between the M3toDE under-bark volume estimates using the DBM, PLM, VAL, GTS, and TP bark deduction methods. For all statistical tests, the $\alpha = 5\%$ level of significance was set. Tests were conducted in the Statistica package (Version 13, 2018). For testing differences between under-bark volume estimates according to each two bark deduction methods, Wilcoxon matched pairs tests were used, followed by the Bonferroni method for *P*-value correction, in the statistical software R (Version 4.2.3, 2023).

RESULTS

In total, 4 345 logs produced from 637 stems of European larch were analysed. Logs were processed by a harvester, and their over-bark volumes were estimated according to two different algorithms of M3s and M3toDE price categories. The mean over-bark volume according to M3s was statistically significantly higher ($P < 0.001$) than the mean over-bark volume according to M3toDE (Figure 1). The total over-bark volume estimated through the M3s price category was higher than that determined by the M3toDE price category. This trend was consistent across all assortment grades, as shown in Table 2. The highest difference was recorded for the roundwood, and that was almost 6%. The total under-bark volume estimated using the VAL bark deduction method was 819.94 m^3, which was 54.09 m^3 (6.6%) more than using the GTS bark deduction method and vice versa by 51.51 m^3 (6.3%) less than using the TP bark deduction method. If we compare this volume with the volumes determined by the harvester software, it was 2.08 m^3 (0.25%) less than when using the DBM bark deduction method and 5.44 m^3 (0.66%) more than when using the PLM bark deduction method.

Significant differences were found [Friedman $\chi 2 = 15.176$; *df* (degrees of freedom) = 4; $P < 0.001$] between under-bark volume estimated according to the M3toDE price category using five different bark deduction methods (Figure 2). When comparing the mean under-bark volume estimates for each pair of bark deduction methods, there were statistically significant differences (all the time $P < 0.001$). The mean under-bark volume using the bark deduction method according to Valenta (2015) was 0.1887 m^3. The mean under-bark volume accord-

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

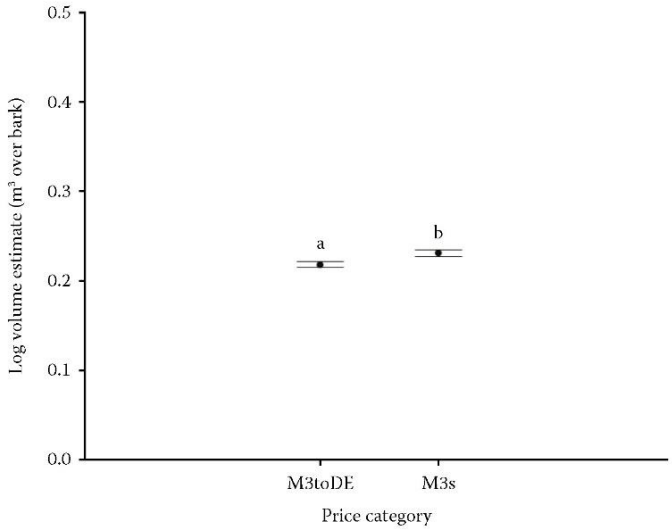


Figure 1. Differences between mean over-bark volumes estimated according to the M3s and M3toDE price categories

a, b – statistically significant differences revealed by the Wilcoxon matched pairs test (α = 5%); bars – indication of standard error

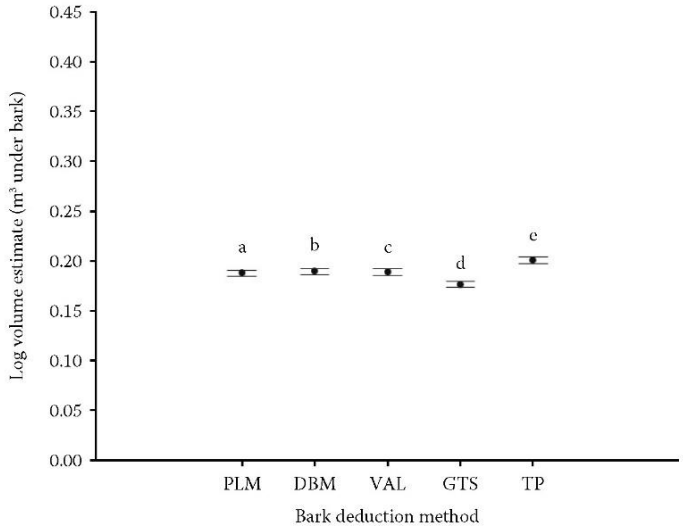


Figure 2. Differences between mean under-bark volumes estimated according to the M3toDE price category using five different bark deduction methods

a–e – statistically significant differences revealed by the Wilcoxon matched pairs test (α = 5%); bars – indication of standard error; PLM – parametric linear bark deduction method (Natov, Dvořák 2018); DBM – diameter band bark deduction method (Natov, Dvořák 2018); VAL – bark deduction method according to Valenta (2015); GTS – bark deduction method according to Wojnar (2007); TP – bark deduction method according to Černý and Pařez (2002)

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

Table 2. Measured European larch timber parameters, estimated double bark thickness and under-bark volumes, using five different bark deduction methods (DBM, PLM, VAL, GTS, TP)

Parameter of logs	All logs	Assortment grade		
		roundwood	pulpwood	firewood
Number of logs	n = 4 345	n = 2 023	n = 2 140	n = 182
Mean *RL* (cm)	324	466	202	172
Mean *MD* (mm o.b.)	254	321	200	125
Total V_{M3s} (m^3 o.b.)	1 003.91	844.94	155.12	3.84
Total V_{M3toDE} (m^3 o.b.)	947.84	794.37	149.67	3.81
RD (%)	–5.59	–5.99	–3.51	–0.78
Mean DBT_{DBM} (mm)	17.14	21.14	13.96	10.15
Mean DBT_{PLM} (mm)	18.17	22.50	14.77	10.00
Mean DBT_{VAL} (mm)	17.42	21.42	14.24	10.32
Mean DBT_{GTS} (mm)	27.22	31.02	24.19	20.71
Mean DBT_{TP} (mm)	9.33	12.31	6.91	4.49
Total V_{DBM} (m^3 u.b.)	822.02	689.59	129.23	3.20
Total V_{PLM} (m^3 u.b.)	814.50	683.67	127.64	3.18
Total V_{VAL} (m^3 u.b.)	819.94	688.22	128.51	3.20
Total V_{GTS} (m^3 u.b.)	765.85	646.66	116.50	2.69
Total V_{TP} (m^3 u.b.)	871.45	729.72	138.21	3.52

n – number of logs; o.b. – over bark; u.b. – under bark; *RL* – required length; *MD* – midspan diameter; V_{M3s} – log over-bark volume estimate according to the M3s price category; V_{M3toDE} – log over-bark volume estimate according to the M3toDE price category; *RD* – relative difference between the total over-bark volume of logs estimated according to the M3s price category and the total over-bark volume estimated according to the M3toDE price category; DBT_{DBM} – double bark thickness according to the diameter band bark deduction method (Natov, Dvořák 2018); DBT_{PLM} – double bark thickness according to the parametric linear bark deduction method (Natov, Dvořák 2018); DBT_{VAL} – double bark thickness according to Valenta (2015); DBT_{GTS} – double bark thickness according to Wojnar (2007); DBT_{TP} – double bark thickness according to Černý and Pařez (2002); V_{DBM} – log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the diameter band bark deduction method (Natov, Dvořák 2018); V_{PLM} – log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the parametric linear bark deduction method (Natov, Dvořák 2018); V_{VAL} – log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the bark deduction method according to Valenta (2015); V_{GTS} – log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the bark deduction method according to Wojnar (2007); V_{TP} – log under-bark volume estimate according to the M3toDE price category, using the bark deduction method according to Černý and Pařez (2002)

ing to the diameter band bark deduction method (Natov, Dvořák 2018) was 0.1892 m^3 and deviated least from this value. After that, it was the mean under-bark volume (0.1875 m^3) according to the parametric linear bark deduction method (Natov, Dvořák 2018). In contrast, the volumes according to Wojnar (2007) and Černý and Pařez (2002) deviated the most (0.1763 m^3, resp. 0.2006 m^3).

DISCUSSION

In 2022, harvester technology reached 45% of the total annual volume of timber produced in Czechia (MoA 2023). Even though the structure of forest stands is slowly changing after the bark beetle outbreak and with regard to the changing natural conditions due to climate change, harvester technology has and will have a significant presence in Czech forest management. Despite the fact that the goal of foresters is to establish more diverse forests with a higher proportion of deciduous trees, factors such as suitable terrain conditions in Czechia, the lack of forest workers working in the forest with chainsaws or horses, the development of harvester technology for application in thinning and processing of deciduous trees and still a significant proportion of conifers in forest stands in Czechia, give the assumption to consider the use of harvester tech-

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

nology as a common harvesting method in Czechia also in the future.

Czechia has become the epicentre of the bark beetle calamity in Europe. In 2017–2019, the spruce bark beetle (*Ips typographus*) damaged 3.1–5.4% of the growing stock of spruce forest stands annually (Hlásny et al. 2021b). The bark calamity reached its peak in 2020, when the total annual volume of timber harvesting in Czechia reached 35.75 million m^3 (MoA 2023). Currently, it seems that the calamity is receding, and Czech forestry is slowly returning to its pre-calamity state, which in the volume of felling represents something between 15–17 million m^3 of timber annually. However, the risk of another bark beetle calamity remains. In the future, it is assumed that bark beetle calamities will occur synchronously in areas with an area of hundreds of kilometres due to extreme climatic events, such as heat waves and droughts (Allen et al. 2015; Hlásny et al. 2021a). At the time of the bark beetle outbreak, not much attention was paid to the education of harvester operators. However, now is the right time for consideration at the state level to set educational requirements for the operators of these machines. The background for this already exists – the Guidelines for Electronic Scaling of Timber for Harvesters in Czechia (Natov, Dvořák 2018) and the modern training centre for operators of harvester technology machines in Trutnov, managed by the Czech Forestry Academy Trutnov. Professionally trained operators will ensure the maximum usability of these machines – their efficiency, correct use with regard to the protection of the forest environment and the fulfilment of all functions of the forest, and the reliability of timber production output data.

That is why it is important to know in detail the harvester control and information system, its setting options and to understand the outputs of timber production. As in previous studies (Löwe et al. 2019; Sedmíková et al. 2020), the results of this study confirmed that the over-bark volumes of timber estimated according to the M3toDE price category were underestimated compared to the reference M3s price category. In the case of larch timber, this difference was 5.59% (5.99% for roundwood) – for comparison, the study by Löwe et al. (2019) found a difference of 5.67%. However, because in Central Europe, the scaling of logs according to Huber's formula is used as a standard, we prefer the M3toDE price category for timber production records and trading in the software setting. In addition, we must not forget to apply a bark deduction – timber is sold with bark, but the sales volume is given as under-bark volume. In the harvester system, only the band or parametric linear bark deduction models can be applied (polynomial is not supported by software).

The Guidelines for Electronic Scaling of Timber for Harvesters in Czechia (Natov, Dvořák 2018) make it possible to select the DBM and PLM methods for bark deduction, both compiled according to the Valenta (2015) model. Valenta (2015) constructed a polynomial model for the bark deduction of larch based on bark measurements of larch logs at various locations in Czechia. The results of this study showed that the estimated under-bark volume by using the VAL bark deduction method (Valenta 2015) was only 0.25% smaller than using the DBM bark deduction method, and 0.66% larger than using the PLM bark deduction method. It is thus possible to use both methods, which, according to Natov and Dvořák (2018), are listed in the GEH. It may be easier for the harvester operator to use the PLM method when setting up the production of assortments for larch because he enters only two parameters. The results of our research show that the under-bark volumes of larch timber were significantly different when using GTS (Wojnar 2007) and TP (Černý, Pařez 2002). The volume according to VAL was 6.6% higher compared to GTS but, on the contrary, 6.3% lower compared to TP.

The differences are due to the fact that for the bark deduction of larch, in the case of GTS, the tables for bark deduction of Scots pine butt logs are used, and in the case of TP, the tables for bark deduction of Scots pine other (normal) logs are used (i.e. larch timber is assigned to the group under Scots pine). Valenta (2015) found that only in short, 2 m long, butt logs was larch bark thickness equal to or greater than that of pine butt logs. The use of these models for larch in forest management can lead to inaccuracies and commercial disputes.

CONCLUSION

The difference found in the produced over-bark volume of larch timber when using the price category M3s compared to M3toDE reached 5.59% (for logs 5.99%), which was comparable to the study by Löwe et al. (2019). However, for use in Czech forestry, due to standardised procedures for scaling

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

Table 3. Comparison of the total under-bark volume of produced larch timber according to different bark deduction methods used in this study

Bark deduction method	Total volume estimate (m^3 u.b.)	Differences (%) from VAL	Usable in harvester software
DBM (Natov, Dvořák 2018)	822.02	0.25	yes (individual values)
PLM (Natov, Dvořák 2018)	814.50	0.66	yes (linear equation)
VAL (Valenta 2015)	819.94	–	no (non-linear equation)
GTS (Wojnar 2007)	765.85	6.60	no (non-linear equation)
TP (Černý, Pařez 2002)	871.45	−6.30	no (non-linear equation)

u.b. – under bark; DBM – diameter band bark deduction method; PLM – parametric linear bark deduction method; VAL – bark deduction method according to Valenta; GTS – bark deduction method according to the Guidelines for Timber Scaling in Czechia; TP – bark deduction method according to the Tables and Polynomials for Estimating Under-bark Volume of Logs

timber based on the Huber formula, it is currently necessary to use the M3toDE price category. Therefore, this price category was also used when comparing under-bark volumes according to different bark deduction methods. The results revealed that differences exist between all the five methods investigated. However, the volumes estimated by the DBM and PLM methods, which can be used in harvesters, reach low differences compared to the VAL method, 0.25% and 0.66%, respectively. In contrast, the GTS and TP methods, which are used today in Czech forestry to estimate volumes of individual logs, underestimate by 6.6% (the difference between VAL versus GTS) and overestimate by 6.3% (the difference between VAL versus TP). This is due to the use of values from the tables for the bark deduction of Scots pine, not European larch directly, in the GTS and TP methods. Table 3 presents a summary of the compared bark deduction methods.

Detailed knowledge of harvester control and information systems is currently necessary for the operator of these machines. Without this knowledge, it is not possible to ensure the correct and effective use of harvester technology in Czech forests, which have experienced a massive bark beetle outbreak in recent years and are currently transforming stands into more diverse forests with the use of forest management practices that are closer to nature. It is therefore important to pay attention to sub-topics, such as the processing of larch timber and the possibility of estimating its over- and under-bark volume. Understanding this sub-issue will help in training operators and acquiring comprehensive knowledge about the functioning of harvester software. It will also help in maximising the economic effect when trading larch timber, the price of which is higher compared to other economic conifers (spruce, pine, fir). For this reason, the machine operator must correctly determine the tree species (in this case, European larch) and have an appropriately set al.orithm for the production of assortments (including the price category and bark deduction method). In further studies, it is necessary to focus on other sub-issues of the effective use of harvester software and the comparison of common forestry practices in the production and trading of timber in order to be able to explain possible differences, for example, between the records of timber production from a harvester and when using a chainsaw.

REFERENCES

Allen C.D., Breshears D.D., McDowell N.G. (2015): On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. Ecosphere, 6: 1–55.

Bottero A., Garbarino M., Long J.N., Motta R. (2013): The interacting ecological effects of large-scale disturbances and salvage logging on montane spruce forest regeneration in the western European Alps. Forest Ecology and Management, 292: 19–28.

BW-HKS (1983): Gesetzliche Handelsklassensortierung für Rohholz (Forst-HKS) mit Ergänzungsbestimmungen für BadenWürttemberg. Stuttgart, Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: 25. (in German)

Černý M., Pařez J. (2002): Tabulky a polynomy pro výpočet objemu kulatiny bez kůry. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 23. (in Czech)

Dvořák J., Bystrický R., Hošková P., Hrib M., Jarkovská M., Kováč J., Krilek J., Natov P., Natovová L. (2011): The Use of Harvester Technology in Production Forests. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 156.

https://doi.org/10.17221/28/2024-JFS

Ferrari E., Spinelli R., Cavallo E., Magagnotti N. (2012): Attitudes towards mechanized cut-to-length technology among logging contractors in Northern Italy. Scandinavian Journal of Forest Research, 27: 800–806.

Gellerstedt S., Dahlin B. (1999): Cut-to-length: The next decade. International Journal of Forest Engineering, 10: 17–25.

Hlásny T., Merganičová K., Modlinger R., Marušák R., Löwe R., Turčáni M. (2021a): Prognosis of bark beetle outbreak and a new platform for the dissemination of information about the forests in the Czech Republic. Zprávy lesnického výzkumu, 66: 197–205. (in Czech)

Hlásny T., Zimová S., Merganičová K., Štěpánek P., Modlinger R., Turčáni M. (2021b): Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. Forest Ecology and Management, 490: 119075.

Jankovský M., Dvořák J., Löwe R., Natov P., Nuhlíček O. (2023): Double bark thickness estimation models of common European broadleaved species for harvester timber volume estimation in Czechia. Croatian Journal of Forest Engineering, 44: 95–102.

Löwe R., Sedmíková M., Natov P., Jankovský M., Hejcmanová P., Dvořák J. (2019): Differences in timber volume estimates using various algorithms available in the control and information systems of harvesters. Forests, 10: 388.

Lundbäck M., Häggström C., Nordfjell T. (2018): Worldwide trends in the methods and systems for harvesting, extraction and transportation of roundwood. In: Proceedings of the 6th International Forest Engineering Conference 'Quenching Our Thirst for New Knowledge', Rotorua, Apr 16–19, 2018: 1–3.

Mederski P.S., Bembenek M., Karaszewski Z., Pilarek Z., Łacka A. (2018): Investigation of log length accuracy and harvester efficiency in processing of oak trees. Croatian Journal of Forest Engineering, 39: 173–181.

MoA (2023): Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2022. Prague, Ministry of Agriculture of the Czech Republic: 134. (in Czech)

Moskalik T., Borz S.A., Dvořák J., Ferenčík M., Glushkov S., Muiste P., Lazdiņš A., Styranivsky O. (2017): Timber harvesting methods in Eastern European countries: A review. Croatian Journal of Forest Engineering, 38: 231–241.

Natov P., Dvořák J. (2018): Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018. Litomyšl, Produkce BPP s.r.o.: 136. (in Czech)

Pokorný P., Hošková K., Prach J., Šída P., Bednář P. (2023): New paleobotanical data prove the native status of European larch (*Larix decidua* Mill.) in North Bohemia. Zprávy lesnického výzkumu, 68: 197–205. (in Czech)

Sedmíková M., Löwe R., Jankovský M., Natov P., Linda R., Dvořák J. (2020): Estimation of over- and under-bark volume of Scots pine timber produced by harvesters. Forests, 11: 626.

Skogforsk (2007): Standard for Forest Data and Communications. Uppsala, The Forest Research Institute of Sweden: 10. Available at: https://www.skogforsk.se/cd_20190114161714/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/stanford_maindoc_070327.pdf (accessed Jan 3, 2024).

Skogforsk (2024): StanForD 'Classic' Documents. Uppsala, The Forest Research Institute of Sweden. Available at: https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/ (accessed Jan 3, 2024).

Spinelli R., Lombardini C., Magagnotti N. (2014): The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. Silva Fennica, 48: 1–15.

Valenta J. (2015): Zjišťování objemu modřínových a douglaskových výřezů. Lesnická práce, 94: 454–456. (in Czech)

Wojnar T. (2007): Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v ČR 2008. 2nd Ed. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 147. (in Czech)

Zinkevičius R., Steponavičius D., Vitunskas D., Činga G. (2012): Comparison of harvester and motor-manual logging in intermediate cuttings of deciduous stands. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 36: 591–600.

Received: April 5, 2024
Accepted: May 9, 2024
Published online: July 16, 2024

5.3 Rozdíly mezi stanovením objemu dříví za využití různých algoritmů dostupných ve výrobně-evidenčních systémech harvestorů

Originální název: Differences in Timber Volume Estimates Using Various Algorithms Available in the Control and Information Systems of Harvesters

Löwe, R.; **Sedmíková, M**.; Natov, P.; Jankovský, M.; Hejcmanová, P.; Dvořák, J. Differences in Timber Volume Estimates Using Various Algorithms Available in the Control and Information Systems of Harvesters. *Forests* 2019, 10, 388. https://doi.org/10.3390/f10050388

Článek se zaměřuje na analýzu metod používaných pro stanovení objemu výřezů dle standardu StanForD a srovnání rozdílů objemů výřezů podle jednotlivých algoritmů těchto metod. Ze 14 různých typů cen, které StanForD nabízí pro stanovení objemu výřezu a jeho třídění, bylo identifikováno sedm různých algoritmů (A1–A7) pro stanovení evidovaného objemu výřezu. Algoritmus A2, využívaný při nastavení typu ceny M3s nebo Log, byl považován za referenční, protože objem stanovený tímto algoritmem by měl nejlépe odpovídat skutečnému objemu výřezu (Skogforsk, 2012). Do studie bylo zahrnuto celkem 231 196 výřezů. Byly zjištěny statisticky významné rozdíly mezi objemy výřezů určenými různými algoritmy, kromě porovnání algoritmů A2 a A3, kde rozdíl nebyl významný. Po rozdělení výřezů do jednotlivých sortimentů se ukázalo, že významné rozdíly existují i mezi objemy v rámci každé skupiny sortimentů podle různých algoritmů. Ve skupině sortimentů Kulatina, která obsahovala nejcennější výřezy, byl celkový objem stanovený algoritmem A5 o více než 6 % nižší než objem stanovený algoritmem A2. To je významné, protože algoritmus A5 je běžně používán v některých zemích střední Evropy včetně ČR pro určování objemu kulatiny při těžbě dříví harvestorovou technologií.

forests

MDPI

Article

Differences in Timber Volume Estimates Using Various Algorithms Available in the Control and Information Systems of Harvesters

Radim Löwe [1,*], Monika Sedmíková [1], Pavel Natov [1], Martin Jankovský [1], Pavla Hejcmanová [2] and Jiří Dvořák [1]

[1] Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 16521 Prague 6, Suchdol, Czech Republic; sedmikovam@fld.czu.cz (M.S.); natov@fld.czu.cz (P.N.); jankovskym@fld.czu.cz (M.J.); dvorakj@fld.czu.cz (J.D.)

[2] Faculty of Tropical AgriSciences, Czech University of Life Sciences Prague, Kamýcká 129, 16521 Prague 6, Suchdol, Czech Republic; hejcmanova@ftz.czu.cz

* Correspondence: lowe@fld.czu.cz; Tel.: +420-607-108-112

Received: 29 March 2019; Accepted: 30 April 2019; Published: 30 April 2019

check for updates

Abstract: Timber is the most important source of revenue in forestry and, therefore, is necessary to precisely estimate its volume. The share of timber volume produced by harvesters is annually growing in many European countries. Suitable settings of harvesters will allow us to achieve the most accurate volume estimates of the produced timber. In this study, we compared the different methods of log volume estimation applied by control and information systems of harvesters. The aim was to analyze the price categories that can be set up in the StanForD standard and to determine the differences between the algorithms used for log volume estimations. We obtained the data from *.STM files collected from March 2017 until June 2018 on a medium-size harvester. We analyzed price categories and found seven different algorithms used to estimate the log volumes. Log volume estimates according to Algorithm A2 were considered as standard because these estimates should be closest to the true log volumes. Significant differences, except the difference between Algorithm A2 and Algorithm A3, were found between log volumes estimated by different algorithms. After categorization of logs to assortments, the results showed that significant differences existed between algorithms in each assortment. In the roundwood assortment, which contains the most valuable logs, a difference of more than 6% was found between the log volumes estimated by Algorithm A5 and Algorithm A2. This is interesting because Algorithm A5 is widely used in some Central European countries. To obtain volumes closest to the true volumes, we should use Algorithm A2 for the harvester production outputs. The resulting differences between the algorithms can be used to estimate the volume difference between harvester outputs using the different price categories. Understanding this setting of harvesters and the differences between the price categories will provide users useful information in applied forest management.

Keywords: bucking; log; StanForD; stem file; tree measurement; TimberMatic; CTL method

1. Introduction

Timber is the most important source of revenue in forestry. Besides grade, which affects the price per unit, it is necessary to precisely estimate volume and weight to quantify the amount of merchantable timber. Incorrect estimates of timber quantity affect the economic vitality of enterprises and forest owners. Besides the effects of the accuracy of the estimates on revenue, they also have a function on a societal level, serving as inputs into records and being used in industrial statistics.

There are many different ways of measuring timber. Measurements can be manual or automatic, depending on the logging method and technology. Timber can be scaled based on diameter measured either over or under bark [1]. For automated measurements that are rapid and accurate, there is no reason not to scale immediately after felling. In fact, it enables precise record keeping in forestry and reduces risk of losing timber during handling.

The use of manual, semiautomatic or automatic measurement is closely related to logging methods. Pulkki [2] describes five logging methods used around the world. He distinguishes between cut-to-length (CTL), tree-length, full-tree, whole-tree, and complete-tree logging methods. These methods differ in the form and size of logs hauled from the forest immediately after logging [3]. The CTL logging method can be described as a series of operations, in which standing trees are converted to timber assortments directly at the stump [4]. The assortments are produced during forest harvesting to increase net revenue early in the production chain [5,6]. The frequency that the CTL method is used varies between countries. Almost all logging in Sweden, Finland, and Norway is carried out by the CTL method [7,8]. The CTL method plays an important role in other European countries as well; in Estonia, 80% of all timber is logged by the CTL method, whilst in Latvia, 70%; Germany, 65%; Spain, 60%; and Italy, 60% [8]. Similarly, the share of the CTL method in the total amount of annual logging is increasing over the long term in countries such as the Czech Republic [9] and Poland [10], mainly due to the popularity of harvester technology. The reason for the increasing usage of harvester technology is that mechanized harvesting increases productivity and reduces costs and damages compared to motor-manual harvesting [11]. In the Czech Republic, the share of the CTL method reached 34% of total annual logging in 2017 [12], though this proportion may continue to grow to at least 50% [13].

Harvesters automate the measurement of log dimensions and subsequent volume estimation. If a machine is properly calibrated and set up, the outputs from its control and information system can be accepted as an accurate estimate of the amount of harvested timber by that machine. Although the harvesters are capable of measuring lengths with the accuracy in centimeters and diameters in millimeters [14], Czech forestry is lacking a standard that would govern the acceptance of these measurements by official records. This is also true for Germany and other European countries [15]. On the other hand, the outputs from harvesters can be affected by measurement errors, practices used, and bucking procedures [6]. For harvester outputs to be considered trustworthy in forestry record keeping, it is necessary for the forestry community to become familiar with the functioning of control and information systems.

Machine manufacturers supply the harvesters equipped with control and information system suites, often containing several separate software products. This software provides means of communication with the measuring sensors placed on the harvester head and converts the measured data (pulses and voltages) into metrics (lengths and diameters). Diameters of a log are recorded every 1 to 10 cm of its length—this distance depends on the control and information system and the standard file type. The measured data are stored in a unified data format, according to the StanForD standard. This communication standard allows data transfer between harvesters from different producers without problems. It was developed and is maintained by Skogforsk, the Forestry Research Institute of Sweden. The original StanForD was developed in 1988, and in 2011, an updated version was published. The updated version was named StanForD 2010 and the original was renamed to StanForD Classic [16]. In the Czech Republic, most of the harvesters still use StanForD Classic, which specifies data in more than 20 standard file types, such as *.KTR files for control measurement data, *.PRD files for production data, *.STM files for stem information, *.APT for bucking instruction data, and so on [17]. The StanForD offers a selection of 14 different price categories [18]. The price category defines the algorithm for volume estimation from the measured data (diameters and lengths) and also determines which diameter of the log (midspan or top-end) determines the inclusion of the log into individual assortments [19].

To enable the efficient use of any technology, we must study all relevant characteristics connected to it. Several aspects of using the harvester technology were studied, such as the damage to logs by feed roller spikes [20–22], the impact of heavy machinery on soil [23], harvester efficiency and performance [24,25], bucking optimization [26], harvester productivity [27–29], time consumption analysis [30–32] and harvester operators [33]. However, one key aspect of the harvester technology has been largely neglected in the scientific literature: the control and information systems and standards connected with their settings to achieve the most accurate volume estimates of the produced timber.

Therefore, this study compares the different methods of log volume estimation applied by the control and information systems of harvesters in conjunction with different price categories. The aim of this study was to analyze the price categories and to determine the differences between the algorithms used for log volume estimations. The algorithms use different parameters and calculation procedures to estimate the log volume. Therefore, we expect them to provide significantly different estimates of log volume, regardless of the assortment considered. It is important to consider this in the forestry practice, as even a seemingly minuscule error in volume estimation (e.g., due to using an inappropriate algorithm) can have a severe effect on the timber production in large-scale harvesting operations. Errors in volume estimation directly affect revenues, because they manifest in the amount of timber supplied to the market. This is especially true for roundwood, the most valuable assortment produced. Understanding this setting of harvesters and the differences between the price categories will provide users useful information in applied forest management.

2. Materials and Methods

2.1. Data Collection

The data were collected from March 2017 until June 2018 on a medium-size John Deere 1270E harvester. The machine was equipped with the TimberMatic control and information system and with a Waratah 480C harvester head. In the Czech Republic, the vast majority of harvesters use StanForD Classic. Therefore, a harvester using this standard was selected for this study. The harvester was owned by a private forest company. Harvests included mainly final felling and took place in Central Bohemia, South Bohemia, Vysočina and South Moravia Regions of the Czech Republic (Figure 1).

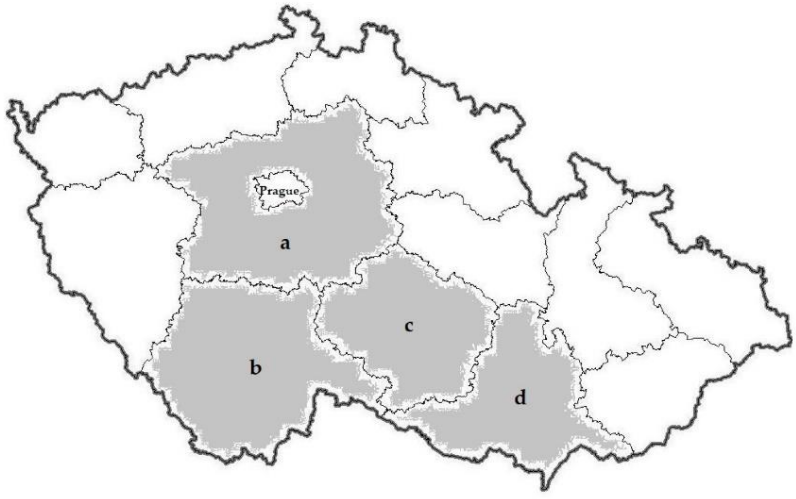


Figure 1. Map of the Czech Republic showing the Regions from where the harvester data originated. These regions are marked in gray: (**a**) Central Bohemia Region; (**b**) South Bohemia Region; (**c**) Vysočina Region; (**d**) South Moravia Region.

We dealt with *.STM files that contained lengths and diameters along 10 cm length increments of each recorded stem. For the purpose of this study, a total amount of 40,930 *.STM files were used. In this study, we analyzed Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) timber. Data from *.STM files represent a total amount of 231,196 spruce logs. To ensure the accuracy of the measured lengths and diameters, a control measurement was performed at the beginning of each working day. In the control measurements, the harvester felled from three to five trees, which were processed into logs. The harvester recorded the log lengths and diameters and created the *.STM control tree files. Subsequently, the harvester operator imported the *.STM data from the control and information system of the harvester into the Haglöf Digitech Professional II digital caliper with Kermit communication, equipped with the Digitech Tape and remeasured the logs. The caliper was set to automatic and used Skalman 6.11 software (Haglöf Sweden AB: Långsele, Sweden). In this setting, the harvester operator was guided for measurement locations by audio alerts of the caliper. When the control measurements were finished, the caliper created a *.KTR file. This file contains deviations between the log lengths and diameters as measured by the harvester and the caliper. If more than 20% of the diameters differed by more than 4 mm or more than 20% of the lengths differed by more than 2 cm, the harvester measuring device was calibrated. The calibration was realized by transferring the *.KTR file from the digital caliper to the harvester on-board computer. The TimberMatic software (1.19, Deere & Company: Moline, Illinois, USA) allows for the performance of automatic calibration of length and diameter gauges in the harvester head from the *.KTR file according to StanForD Classic.

2.2. Price Categories and Volume Estimation Algorithms

The TimberMatic software had 14 price categories pre-set. The description of each price category contained information about the algorithm used for the log volume estimation and also information about the diameter used for sorting the logs to individual assortments [18]. Some price categories differed only in using a different diameter to determine the assortment of the log, and their algorithm for the calculation of the log volume estimate remained the same. If some price categories were not described in detail [18], they were excluded. Two price categories were excluded from this study. They were the Board feet price category, which is not defined in the standard due to the very large number of different calculation methods that exist [18], and the M3sB price category, where the bulk volume is calculated with the default diameter and length of the bundle [34]. Other price categories were divided into groups according to the algorithm used to estimate the log volume. Price categories that contained the same algorithm for the log volume estimate were merged. This way, we ended up with seven different algorithms for the calculation of log volume estimates according to StanForD (Table 1).

Table 1. Seven algorithms (A1–A7) for log volume estimations according to StanForD. Price categories were merged to algorithms based on the log volume estimating algorithm.

Algorithm	Name of the Price Category
A1	M3to (code 1); M3tos (code 14)
A2	M3s (code 2); Log (code 3)
A3	M3sNO (code 4); LogNO (code 11)
A4	M3tobutt (code 5)
A5	M3toDE (code 6); M3miDE (code 7)
A6	M3smimi (code 8); M3sm (code 10)
A7	M3sEST (code 13)

All log diameters were measured over bark. Log volumes were estimated in m^3 over bark and from the required length (nominal log length) instead of the total length (bucked length). Price categories were described in detail by Skogforsk [18].

Log volume according to Algorithm A1 was estimated by top-end diameter (*TD*) in millimeters and required length in centimeters. The *TD* measurement was always performed at the end of the required log length, i.e., 0 cm from the top end. The volume was estimated according to Equation (1):

$$V_{A1} = [\pi \times (TD/1000)^2]/4 \times (RL/100) \quad (1)$$

where: V_{A1} is the log volume (m^3 over bark), $\pi = 3.14$, *TD* is the top-end diameter (mm), *RL* is the required length (cm).

The log volume estimate according to Algorithm A2 included price categories M3s and Log. Skogforsk [18] states that the volume estimated by the M3s is closest to the true volume of a log, because it measures the over bark diameter at each end of a 10 cm long section of the log. These measurements are then averaged, thus approximating the section as a cylinder. As the feeding rollers move the stem through the measurement devices, the machine adds up the volume of all sections calculated through Huber's formula until it reaches the threshold diameter for smallwood of the set price category [35]. For the last section, which is shorter than 10 cm, the real length is used in volume estimation. The total volume of the log is then calculated as the sum of all section volumes. This reduces the possible deviation from the true volume to a minimum. Total log volumes according to Algorithm A2 were taken from the *.STM file where they are automatically recorded.

Other algorithms use various measured or calculated diameters and required length of the log to calculate volume estimates. These algorithms were added to the StandForD standard to meet the requirements of key timber producers and make the outputs of harvesters and other scaling methods compatible in forestry record-keeping.

Log volume according to Algorithm A3 was estimated based on the calculated theoretical midspan diameter of the log (*TMD*) and the required length. The required length in decimeters was used for estimating the log volume. Therefore, the length measured in centimeters was rounded down to the nearest whole decimeter. The registered diameter measured at a distance of 10 cm from the top of the log (TD_{10}) was used for calculating the theoretical midspan diameter (*TMD*). The TD_{10} measured in millimeters was rounded down to the nearest whole centimeter. Equation (2) was used to calculate the log midspan diameter:

$$TMD = TD_{10} + (RL/2/10) + 0.5 \quad (2)$$

where: *TMD* is the theoretical midspan diameter (cm), TD_{10} is the diameter at a distance of 10 cm from the top of the log (cm), and *RL* is the required length (dm).

Then, the log volume was calculated in dm^3 according to Equation (3):

$$V_{A3} = (TMD/10)^2 \times \pi/4 \times RL \quad (3)$$

where: V_{A3} is the log volume (dm^3 over bark, subsequently converted to m^3 for volume comparisons), *TMD* is the theoretical midspan diameter (cm), $\pi = 3.14$, and *RL* is the required length (dm).

Log volume according to Algorithm A4 was estimated based on diameters measured at a distance of 10 cm from the top of the log and at a distance of 10 cm from the log butt end. In the case of a butt log (stem base), a second diameter was measured at a distance of 50 cm from the log butt end. Log volume was calculated according to the following Equation (4):

$$V_{A4} = \pi/4 \times RL/100 \times [a \times (BD_{10(50)}/1000)^2 + (1 - a) \times (TD_{10}/1000)^2] \quad (4)$$

where: V_{A4} is the log volume (m^3 over bark); $\pi = 3.14$, *RL* is the required length (cm); *a* is the parameter assigned according to the length and top end diameter of the log [18]; BD_{10} or BD_{50} is the diameter at a distance of 10 cm from the log butt end (mm) or at a distance of 50 cm from the butt end in the case of a butt log; and TD_{10} is the diameter at a distance of 10 cm from the top of the log (mm).

Log volume according to Algorithm A5 was estimated based on the midspan diameter and the required length. For volume estimation, the midspan diameter was rounded down to the nearest

whole centimeter according to the Handelsklassensortierung (sorting of merchantable wood; further in text HKS) method [18,36]. The total log volume was calculated according to Equation (5):

$$V_{A5} = \pi \times (MD^2/4/10{,}000) \times RL/100 \quad (5)$$

where: V_{A5} is the log volume (m^3 over bark), $\pi = 3.14$, MD is the midspan diameter (cm), and RL is the required length (cm).

Log volume according to Algorithm A6 was estimated based on the midspan diameter and the required length. The midspan diameter was measured in millimeters and was not rounded. The total log volume was calculated according to Equation (6):

$$V_{A6} = \pi \times (MD^2/4/1{,}000{,}000) \times RL/100 \quad (6)$$

where: V_{A6} is the log volume (m^3 over bark), $\pi = 3.14$, MD is the midspan diameter (mm), and RL is the required length (cm).

Log volume according to Algorithm A7 was estimated based on the top-end diameter of the log. The volume was calculated according to Equation (7):

$$V_{A7} = [\ TD^2 \times RL \times (a_1 + a_2 \times RL) + a_3 \times RL^2]/10{,}000 \quad (7)$$

where: V_{A7} is the log volume (m^3 over bark), TD is the top-end diameter (mm), RL is the required length (dm) with at least one decimal, $a_1 = 0.07995$ is the tree species dependent conic factor for spruce, $a_2 = 0.000161$ is the tree species dependent conic factor for spruce, and $a_3 = 0.04948$ is the tree species dependent conic factor for spruce (a_1, a_2 and a_3 factors are by Skogforsk [18]).

2.3. Stem Files Analysis

Data stored in the *.STM files were transferred to the MS Excel spreadsheets using the STeMa application. The variables obtained from the *.STM files were the following: (i) tree species (SP), (ii) assortment (AS), (iii) total length (TL), (iv) required length (RL), (v) log volume according to M3s (A2), and (vi) top-end diameter (TD). Other variables necessary for log volume estimation by particular algorithms were calculated during the iteration of each single *.STM file by analysis of the StanForD variable that contains the taper curve of the produced stem and allows for the extraction of variables that are not a direct part of the saved *.STM file by using a suitable algorithm. This way, the following variables were obtained: (i) midspan log diameter (MD), (ii) diameter at a distance of 10 cm from the top end of the log (TD_{10}), (iii) diameter at a distance of 50 cm from the log butt end (BD_{50}), and (iv) diameter at a distance of 10 cm from the log butt end (BD_{10}). After the batch processing of the *.STM files was finished, the data were saved in the *.CSV format. This format allows for easy conversion to the *.XLSX format, which is suitable for further data analysis. Data in the *.XLSX format were subsequently used for estimation of the log volumes according to the individual algorithms.

2.4. Assortment Categorization

The stem of the felled tree was cut into individual logs by the harvester. Each log represented an assortment, meeting the tree species, dimensions, and quality requested by the customer. The harvester operator determined the tree species and grade; the machine software then suggested the assortment to be produced based on the quantitative parameters. We distinguished the logs into three assortments: (i) firewood (FW), the lowest grade of timber intended for energy use; (ii) pulpwood (PW), timber intended for production of wood pulp products; and (iii) roundwood (RW), the highest grade of timber intended for industrial processing, such as for veneer logs, timber for the production of musical instruments, sawn wood, poles, etc.

2.5. Data Analyses

First, we calculated the absolute (in m^3 over bark) and the relative (in %) differences between the log volumes estimated by each algorithm and Algorithm A2. We also calculated the relative differences between the log volume estimates for the seven different algorithms, differentiated by assortment categorization. Then, we used general linear models (GLM), specifically ANOVA for repeated measurements, to test differences in log volume estimates among the algorithms, both for all timber together and categorized according to assortments. The post-hoc tests (Tukey HSD) were used to find out differences between the log volumes estimates according to the respective algorithms. For all statistical tests, the $\alpha = 5\%$ level of significance was set. All tests were conducted in the Statistica 13 package (TIBCO Software Inc.: Palo Alto, CA, USA).

3. Results

Altogether, 231,196 logs were measured, and seven volume estimates were calculated (Table 2).

Table 2. Measured timber parameters and estimated log volumes.

Timber Parameter	All Logs		Assortments					
			Roundwood		Pulpwood		Firewood	
	n = 231,196		*n* = 93,129		*n* = 114,474		*n* = 23,593	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
TL (cm)	294.9	126.7	430.0	83.5	211.3	27.0	167.2	64.1
RL (cm)	288.6	122.3	418.4	81.4	208.1	26.8	167.2	64.1
MD (mm)	207.4	102.0	278.8	79.7	171.0	86.1	101.9	56.4
TD (mm)	193.2	98.8	261.8	78.8	157.9	83.1	93.7	55.1
TD_{10} (mm)	194.1	98.9	262.6	78.8	158.8	83.3	94.3	55.4
BD_{50} (mm)	217.8	106.8	295.3	83.0	177.8	87.4	105.2	57.2
BD_{10} (mm)	222.0	107.6	299.4	83.9	182.4	88.6	108.0	58.0
V_{A1} (m^3)	0.1251	0.1443	0.2431	0.1508	0.0517	0.0647	0.0149	0.0300
V_{A2} (m^3)	0.1453	0.1650	0.2830	0.1694	0.0597	0.0725	0.0170	0.0333
V_{A3} (m^3)	0.1452	0.1636	0.2845	0.1663	0.0582	0.0682	0.0178	0.0334
V_{A4} (m^3)	0.1413	0.1594	0.2744	0.1637	0.0585	0.0696	0.0175	0.0330
V_{A5} (m^3)	0.1370	0.1560	0.2659	0.1608	0.0571	0.0708	0.0164	0.0323
V_{A6} (m^3)	0.1417	0.1593	0.2740	0.1633	0.0596	0.0720	0.0176	0.0332
V_{A7} (m^3)	0.1420	0.1629	0.2781	0.1689	0.0570	0.0686	0.0174	0.0328

N = number of logs, TL = total length, RL = required length, MD = midspan diameter, TD = top-end diameter, TD_{10} - diameter at a distance of 10 cm from the top of the log, BD_{50} = diameter at a distance of 50 cm from the log butt end, BD_{10} = diameter at a distance of 10 cm from the log butt end, V_{A1} = log volume estimate according to Algorithm A1, V_{A2} = log volume estimate according to Algorithm A2, V_{A3} = log volume estimate according to Algorithm A3, V_{A4} = log volume estimate according to Algorithm A4, V_{A5} = log volume estimate according to Algorithm A5, V_{A6} = log volume estimate according to Algorithm A6 and V_{A7} = log volume estimate according to Algorithm A7.

The absolute log volumes estimated by the different algorithms were always lower than the log volumes estimated by Algorithm A2 (Table 3). Algorithm A1 provided log volume estimates which differed the most from those provided by Algorithm A2. The second highest difference was recorded by using Algorithm A5. On the other hand, the smallest difference was recorded using Algorithm A3.

Table 3. Absolute and relative differences between the log volume estimates by seven different algorithms according to StanForD Classic. Differences were related to Algorithm A2.

Algorithm	Total Volume of Logs	Absolute Difference from Algorithm A2	Relative Difference from Algorithm A2
	(m^3 over Bark)	(m^3 over Bark)	%
A1	28,914.92	−4674.31	−13.92
A2	33,589.22	0	0
A3	33,577.46	−11.76	−0.04
A4	32,662.77	−926.46	−2.76
A5	31,684.32	−1904.90	−5.67
A6	32,753.76	−835.46	−2.49
A7	32,835.02	−754.20	−2.25

The relative differences between the log volume estimates were also determined for the seven different algorithms differentiated by assortment. Out of 231,196 logs, 40.3% of logs were roundwood assortments, 49.5% of logs were pulpwood assortments and 10.2% of logs were firewood assortments (Table 4). The total volume of the logs according to Algorithm A2 was 33,589.22 m^3 over bark, out of which roundwood assortments accounted for 78.5%, pulpwood assortments for 20.3%, and firewood assortments for 1.2%.

Table 4. Relative differences between the log volume estimates by seven different algorithms according to the assortment's categorization (roundwood, pulpwood, firewood). Differences were related to Algorithm A2.

Algorithm	Assortments					
	Roundwood		Pulpwood		Firewood	
	Total Volume of Logs	Relative Difference from Algorithm A2	Total Volume of Logs	Relative Difference from Algorithm A2	Total Volume of Logs	Relative Difference from Algorithm A2
	(m^3 over Bark)	%	(m^3 over Bark)	%	(m^3 over Bark)	%
A1	22,643.54	−14.08	5919.51	−13.38	351.87	−12.51
A2	26,353.27	0	6833.77	0	402.18	0
A3	26,495.77	0.54	6661.30	−2.52	420.39	4.53
A4	25,554.26	−3.03	6696.71	−2.01	411.80	2.39
A5	24,759.89	−6.05	6537.43	−4.34	387.00	−3.78
A6	25,519.29	−3.16	6819.89	−0.20	414.91	3.16
A7	25,895.78	−1.74	6528.71	−4.46	410.53	2.08

There were significant differences in the mean log volume estimates among the algorithms (Figure 2a). Algorithm A2 estimated the highest mean log volume and was similar to Algorithm A3. The smallest log volume was estimated by Algorithm A1. Calculations according to assortments followed similar patterns with minor differences (Figure 2b). For the roundwood assortment, the highest log volume was estimated by Algorithm A3, followed by the lower log volume estimated by Algorithm A2. Algorithm A1 provided the smallest log volumes estimates and was followed by Algorithm A5. For the pulpwood assortment, the highest log volume was estimated by Algorithm A2, followed by the significantly lower log volume estimated by Algorithm A6. The smallest log volume was estimated by Algorithm A1 and the second lowest log volume was estimated by Algorithm A5. For the firewood assortment, the highest log volume was estimated by Algorithm A3, which was followed by Algorithm A6. The smallest log volume was also estimated by Algorithm A1 and the second lowest volume was estimated by Algorithm A5.

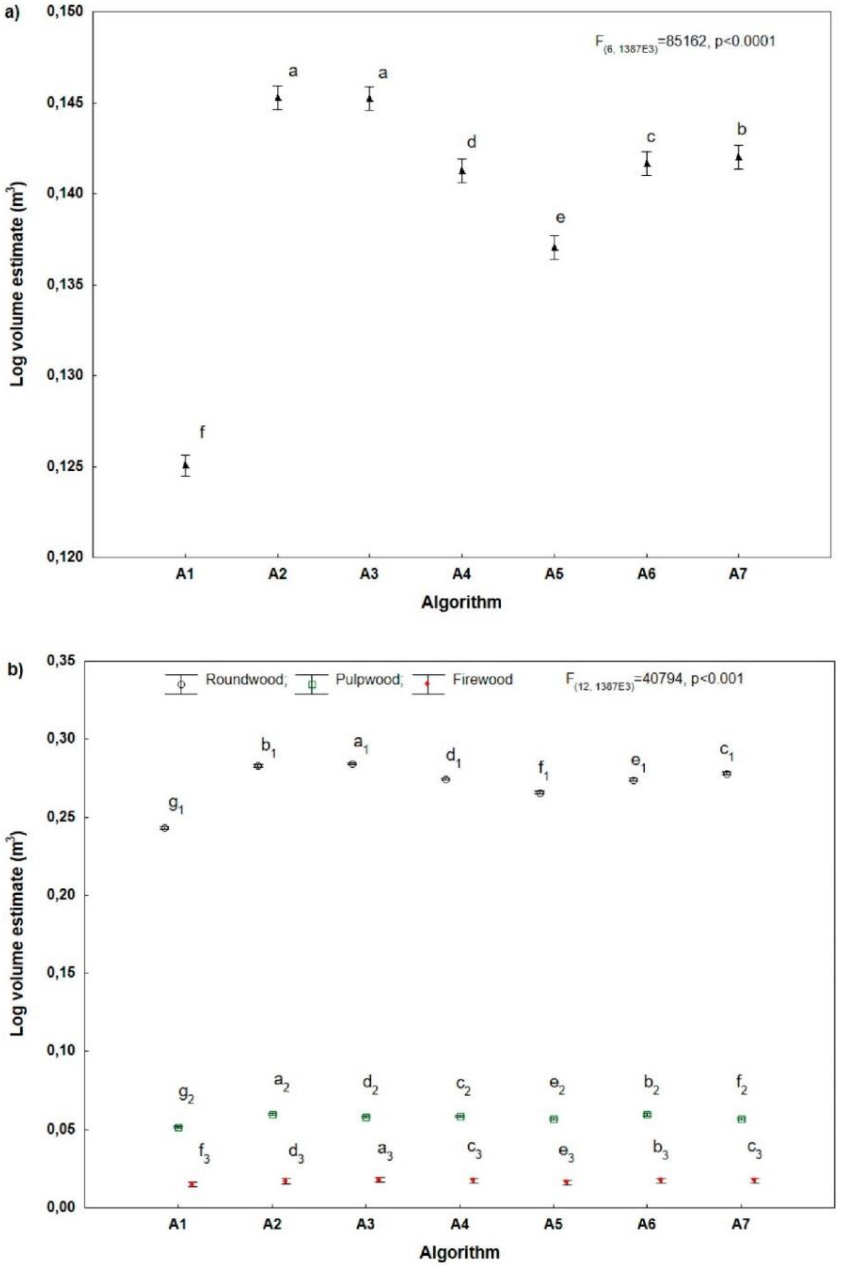


Figure 2. Differences in mean volume estimates per log by different algorithms (**a**) of all logs together, (**b**) according to assortments. Different letters indicate significant differences revealed by post-hoc Tukey HSD tests ($\alpha = 0.05$); assortments were tested separately. The error bars indicate a 0.95 confidence interval. There were no significant differences only between Algorithms A2 and A3 in the group of all logs together (a-a) and between Algorithms A4 and A7 in the firewood assortment (c_3-c_3).

4. Discussion

The results showed significant differences between the log volumes estimated by different algorithms used in the control and information systems of harvesters. A comparison of the obtained results with other studies could not be carried out because we were unable to find suitable scientific literature dealing with the evaluation of volume differences according to the price categories of StanForD. Differences between the volumes estimated by the individual algorithms were related to Algorithm A2. As Skogforsk [18] states, the volume estimated by the Algorithm A2 should be closest to the true volume of the log. However, even this volume estimation algorithm is not absolutely precise; as Hohmann et al. [15] state, harvesters underestimate the log volume by −0.45% on average, compared to the water immersion technique.

The large difference between Algorithm A2 and Algorithm A1 can be explained by the parameters they use to estimate the volume. Algorithm A1 is based on cylindrical volume to estimate the log volume and uses the top-end diameter as the diameter value. Naturally, the top-end diameter is the smallest value that can be used and will result in a substantial underestimation of the log volume, so it is inappropriate for detecting the true log volume. However, it can be assumed that Algorithm A1 was never intended to provide a true log volume, but apparently to provide a value reflecting the volume available for full-length sawn products.

The second largest difference was found between Algorithm A2 and Algorithm A5. According to Algorithm A5, the log volume is estimated based on the measured midspan diameter. However, its value is always rounded down to the nearest whole centimeter. This is in accordance with the HKS method [35] described in detail by Wojnar [37]. Thus, if Algorithm A5 is used to determine the volume of harvester timber production, this cannot be considered as a true timber volume which is felled and hauled from the forest. The large difference was interesting because Algorithm A5 is used in the M3toDE and M3miDE price categories that are used in Central European countries such as Germany, the Czech Republic, Austria, Slovakia, and Hungary. For example, in the Czech Republic, these price categories are recommended because they ensure that the timber volume reported by the harvester will be comparable to the timber volume determined according to the Recommended Rules for Timber Measurement and Sorting in the Czech Republic 2008 [37]. Thus, we deliberately significantly underestimate the volume of timber production.

It is also very interesting to compare the volume results according to Algorithm A5 and Algorithm A6. These two methods differ in one key aspect: Algorithm A6 does not require rounding down the midspan diameter because it is not based on the HKS method. Therefore, the directly measured midspan diameter, in millimeters, is used for the volume estimation. Estimating the volume based on precise midspan diameter halved the margin of error to 3.18% (1069.44 m^3). Therefore, we recommend working with the accuracy of diameter measurements harvesters provide [14] and not round the measured diameters for volume estimation.

Both Algorithm A4 and Algorithm A7 showed a difference in estimated log volumes of less than 3% compared to Algorithm A2. Algorithm A4 uses Equation (4) that contains the "a" parameter, the value of which varies with the log length and top-end diameter. The values of the "a" parameter are listed in [18]. Also, Algorithm A7 uses Equation (7) for log volume estimation. The log volume is estimated by using the top-end diameter of the log and the conic factors whose value depends on the tree species [18]. Thus, the difference from Algorithm A2 could be different if we were to estimate the log volumes of tree species other than the Norway spruce.

Algorithm A3 proved to estimate the volume closest to the benchmark Algorithm A2. This difference was the lowest one and was the only statistically insignificant difference. Algorithm A3 estimated the log volume based on a cylinder with a theoretical midspan diameter of the log and the measured log length rounded down to the nearest whole decimeter. However, the diameter used to estimate the theoretical midspan diameter was actually measured 10 cm from the top of the log. This measured diameter is always rounded down to the nearest whole centimeter. The calculation of the theoretical midspan diameter is based on a standard stem taper that is 1 cm diameter per 1 m

length. Such a standard taper is in accordance with what is stated in [38] for sawlogs. Then, 0.5 cm is added to the calculated theoretical midspan diameter for compensation of the previous rounding. Then, the Huber's equation [35] is used to calculate the log volume. Equation (3), used to calculate the volume according to Algorithm A3, thus appears to be the best alternative to Algorithm A2. However, if we focused on individual assortments, we found that there were significant differences between these two algorithms, though the lowest difference between these two algorithms was in the roundwood assortment. This could be due to the fact that the equation of Algorithm A3 uses the theoretical midspan diameter that is calculated based on the principle of standard stem taper of 1 cm diameter per 1 m length. This stem taper is referred to as the standard for sawlogs, which largely represents the roundwood assortment. On the contrary, pulpwood and firewood assortments contained mainly butt and top logs, which can taper differently than the standard rate [38].

When we compared the differences in the assortments, it was interesting to focus especially on differences in the roundwood assortment that contained not only the highest volume of the logs but also the best economically valued logs. In the roundwood, the results showed that a significant difference occurred between the log volume estimates for each algorithm pair. As compared with the overall difference, the difference between Algorithm A5 and Algorithm A2 increased by 0.38 percentage points. This result was interesting because it showed an increase in the volume difference in the most valuable timber. In some Central European countries, Algorithm A5 is used for harvester production outputs of roundwood. If we would like to use these outputs for selling timber, we would sell more than 6% less timber than what the true volume is. In the case where this underestimation is not reflected in the timber price, this would bring a significant economic loss to the seller, even if the machines were properly maintained and calibrated. We should require credible outputs not only for timber sales, but also for credible timber production records.

Log volumes estimated by Algorithm A2 were the highest in the pulpwood and the second highest in the roundwood. However, in the firewood assortment, the volume estimated by Algorithm A3, Algorithm A4, Algorithm A6, and Algorithm A7 was higher than that estimated by Algorithm A2. This can be due to the fact that the firewood grade contained logs of small dimensions. Procedures for estimating the log volume of firewood logs according to some algorithms are not entirely appropriate for these small dimensions and therefore overestimate the true log volume.

This study was focused only on spruce stems. Generally, cutting and processing coniferous trees is preferred for harvesters. The influence of tree species cannot be ignored when discussing mechanized harvesting [25]. There are still problems when harvesting broadleaved trees by machines associated with delimbing [39], taller stumps in coppice stands [40], and also larger shavings of the bark and the lateral surface of processed assortments [41]. Defects on stems and large branches, which are particularly common in some broadleaved tree species, can cause measurement errors for both the log length and diameter [42]. These errors can significantly affect the precision of volume estimations through various algorithms.

It is necessary to perform regular control measurements of harvester measuring systems and, if necessary, to calibrate the harvester. Regular calibration improves the accuracy of the harvester measurement system [43] and ensures that the volume outputs are credible. Different methods can be used for manual control measurements. In this study, a digital caliper equipped with a digital tape was used. The combination of a digital caliper and a digital tape is faster, more accurate, and more efficient than conventional analog measuring devices. We strongly recommend using this method to calibrate the measuring system of harvesters. Performing regular control measurements and calibration of the machine measuring system secures sufficient measurement accuracy of the timber volume production.

For these results, it is also necessary to note that the log volume estimates in this study were expressed as volumes in m^3 over bark. In this manner, volumes are free from potential inaccuracies caused by the estimation of volume under bark. Marshall et al. [44] dealt with the effects of bark thickness estimates. It is important to note that the resulting volumes compared in this study cannot be compared with the true total volume of logs because timber volumes in this study do not include the

volume of the allowance to the required length and the cutting window volume. The length allowance means the addition of length to some assortments for cross-cutting or other processing, and the cutting window is an addition to the length for ensuring a cut-point tolerance of the harvester measuring sensors, which increases the performance of the machine. In the Czech Republic, the recommended allowance is 2% of the required log length, and the recommended cutting window is within a range from 0 cm to a maximum of 4 cm [19]. The total volume of harvested timber also differs from the volume of standing timber because it does not contain a share of logging residue volume estimates [45].

5. Conclusions

In this study, we revealed significant differences between the log volumes estimated by different algorithms used in the control and information systems of harvesters. The results showed that if we want to use harvester production outputs for timber sales and record keeping, it is necessary to distinguish how the log volumes were estimated. Algorithm A1 proved to be an inappropriate algorithm for estimating the true log volume. There was no significant difference between the log volumes estimated by Algorithm A3 and Algorithm A2. In the roundwood assortment, a difference of more than 6% was found between the log volumes estimated by Algorithm A5 and Algorithm A2. This is an interesting result, especially for some Central European countries, where Algorithm A5 is preferred in harvester production outputs.

To obtain volumes closest to the true volumes, we should use Algorithm A2 for timber production outputs of harvesters. These conclusions are true if the goal is to obtain the most accurate total timber volume that can be used for timber sales and for precise forestry record-keeping. If the measurement would have a different goal, e.g., to estimate the amount of timber for board production, using a different algorithm could be appropriate.

However, the outputs of timber production are useful only if credible. Therefore, it is necessary to perform regular control measurements of the harvester measuring systems and, if necessary, to calibrate the machine. The resulting differences between the algorithms can be used to estimate the volume difference between harvester outputs using different price categories. Further research could be focused on what share of timber is not registered in harvester production outputs due to the length allowance and the cutting window of logs.

Author Contributions: Conceptualization, P.N.; Data curation, R.L.; Formal analysis, R.L., P.N., and P.H.; Funding acquisition, R.L. and M.S.; Investigation, R.L. and M.S.; Methodology, R.L., P.N., M.J., and J.D.; Project administration, R.L. and M.S.; Resources, R.L., M.S., M.J., and P.H.; Software, P.N.; Supervision, J.D.; Validation, J.D.; Writing—original draft, R.L. and M.S.; Writing—review & editing, R.L., M.S., P.N., M.J., and P.H.

Funding: This research was funded by the Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences in Prague, grant projects IGA A/04/18 (Analysis of the Log Volume Estimate Methodologies Used in the Control and Information Systems of Harvesters) and IGA A/08/18 (Analysis of Volume Differences Between Timber Production Outputs of Harvesters and Standing Volume Estimated by the National Forest Inventory II).

Acknowledgments: We would like to thank the private forest company that allowed us to collect data from its harvester.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Edwards, P.N. *Forestry Commission Booklet 49- Timber Measurement: A Field Guide*; HMSO: Edinburgh, UK, 1998; p. 64, ISBN 0-85538-403-4.
2. Pulkki, R. Cut-to-length, tree-length or full tree harvesting? *Cent. Woodl.* **1997**, *1*, 22–27.
3. Rebula, E. Tehnologija u šumarstvu na početku idućeg tisućuljeća. *Mehanizacija šumarstva* **1988**, *13*, 31–40.
4. Malinen, J.; Kilpeläinen, H.; Wall, T.; Verkasalo, E. Variation in the value recovery when bucking to alternative timber assortments and log dimensions. *For. Stud.* **2006**, *45*, 89–100.
5. Faaland, B.; Briggs, D. Log Bucking and Lumber Manufacturing Using Dynamic Programming. *Manag. Sci.* **1984**, *30*, 245–257. [CrossRef]

6. Marshall, H.D. An Investigation of Factors Affecting the Optimal Output Log Distribution from Mechanical Harvesting and Processing Systems. Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis, OR, USA, 2005.
7. Gellerstedt, S.; Dahlin, B. Cut-to-length: The next decade. *Int. J. For. Eng.* **1999**, *10*, 17–25.
8. Lundbäck, M.; Häggström, C.; Nordfjell, T. Worldwide Trends in the Methods and Systems for Harvesting, Extraction and Transportation of Roundwood. In Proceedings of the 6th International Forest Engineering Conference "Quenching our thirst for new Knowledge", Rotorua, New Zealand, 16–19 April 2018; pp. 1–3.
9. Natov, P.; Dvořák, J.; Sedníková, M.; Löwe, R.; Ferenčík, M. Srovnání vyrobeného objemu dříví harvestorem se zásobou porostu stanovenou objemovými tabulkami. *Zprávy Lesnického Výzkumu* **2017**, *62*, 1–6.
10. Bembenek, M.; Mederski, P.S.; Karaszewski, Z.; Łacka, A.; Grzywiński, W.; Węgiel, A.; Giefing, D.F.; Erler, J. Length accuracy of logs from birch and aspen harvested in thinning operations. *Turk. J. Agric. For.* **2015**, *39*, 845–850. [CrossRef]
11. Spinelli, R.; Lombardini, C.; Magagnotti, N. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fenn.* **2014**, *48*, 1–15. [CrossRef]
12. MZe. *Zpráva o Stavu Lesa a Lesního Hospodářství České Republiky v Roce 2017*; Ministry of Agriculture: Prague, Czech Republic, 2018; p. 116, ISBN 978-80-7434-477-0.
13. Dvořák, J.; Bystrický, R.; Hošková, P.; Hrib, M.; Jarkovská, M.; Kováč, J.; Krilek, J.; Natov, P.; Natovová, L. *The Use of Harvester Technology in Production Forests*, 1st ed.; Lesnická práce s.r.o.: Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic, 2011; p. 156, ISBN 978-80-7458-018-5.
14. Sládek, P.; Neruda, J. Analysis of volume differences in measuring timber in forestry and wood industry. In Proceedings of the Austro 2007/FORMEC'07: Meeting the Needs of Tomorrows´Forests—New Developments in Forest Engineering, Wien, Austria, 7–11 October 2007; pp. 1–11.
15. Hohmann, F.; Ligocki, A.; Frerichs, L. Harvester Measuring System for Trunk Volume Determination: Comparison with the Real Trunk Volume and Applicability in the Forest Industry. *Bull. Transilv. Univ. Braşov* **2017**, *10*, 27–34.
16. Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. StanForD. Available online: https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/ (accessed on 19 March 2019).
17. Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. Standard for Forest Data and Communications. 27 March 2007, p. 10. Available online: https://www.skogforsk.se/cd_48e53b/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/stanford_maindoc_070327.pdf (accessed on 19 March 2019).
18. Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. Appendix- Standard for Forest Data and Communications. 18 April 2012, p. 32. Available online: https://www.skogforsk.se/cd_48e53b/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/appendix1_eng_120418.pdf (accessed on 19 March 2019).
19. Natov, P.; Dvořák, J. *Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018*; Produkce BPP s.r.o.: Litomyšl, Czech Republic, 2018; p. 136, ISBN 978-80-906874-7-9.
20. Nuutinen, Y.; Väätäinen, K.; Asikainen, A.; Prinz, R.; Heinonen, J. Operational efficiency and damage to sawlogs by feed rollers of the harvester head. *Silva Fenn.* **2010**, *44*, 121–139. [CrossRef]
21. Gerasimov, Y.; Seliverstov, A.; Syunev, V. Industrial Round-Wood Damage and Operational Efficiency Losses Associated with the Maintenance of a Single-Grip Harvester Head Model: A Case Study in Russia. *Forests* **2012**, *3*, 864–880. [CrossRef]
22. Karaszewski, Z.; Łacka, A.; Mederski, P.S.; Bembenek, M. Impact of season and harvester engine RPM on pine wood damage from feed roller spikes. *Croat. J. For. Eng.* **2018**, *39*, 183–191.
23. Marusiak, M.; Neruda, J. Dynamic Soil Pressures Caused by Travelling Forest Machines. *Croat. J. For. Eng.* **2018**, *39*, 233–245.
24. Apăfăian, A.I.; Proto, A.R.; Borz, S.A. Performance of a mid-sized harvester-forwarder system in integrated harvesting of sawmill, pulpwood and firewood. *Ann. For. Res.* **2017**, *60*, 227–241. [CrossRef]
25. Mederski, P.S.; Bembenek, M.; Karaszewski, Z.; Pilarek, Z.; Łacka, A. Investigation of Log Length Accuracy and Harvester Efficiency in Processing of Oak Trees. *Croat. J. For. Eng.* **2018**, *39*, 173–181.
26. Labelle, E.R.; Huß, L. Creation of value through a harvester on-board bucking optimization system operated in a spruce stand. *Silva Fenn.* **2018**, *52*, 1–22. [CrossRef]
27. Glöde, D.; Sikström, U. Two felling methods in final cutting of shelterwood, single-grip harvester productivity and damage to the regeneration. *Silva Fenn.* **2001**, *35*, 71–83. [CrossRef]
28. Spinelli, R.; Hartsough, B.R.; Magagnotti, N. Productivity Standards for Harvesters and Processors in Italy. *Prod. J.* **2010**, *60*, 226–235. [CrossRef]

29. Strandgard, M.; Walsh, D.; Acuna, M. Estimating harvester productivity in Pinus radiata plantations using StanForD stem files. *Scand. J.* **2013**, *28*, 73–80. [CrossRef]
30. Nurminen, T.; Korpunen, H.; Uusitalo, J. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fenn.* **2006**, *40*, 335–363. [CrossRef]
31. Szewczyk, G.; Sowa, J.M. The accuracy of measurements in a time study of harvester operations. *New Zealand J. For. Sci.* **2017**, *47*. [CrossRef]
32. Pajkoš, M.; Klvac, R.; Neruda, J.; Mishra, P.K. Comparative Time Study of Conventional Cut-To-Length and an Integrated Harvesting Method—A Case Study. *Forests* **2018**, *9*, 194. [CrossRef]
33. Purfürst, F.T. Learning Curves of Harvester Operators. *Croat. J. For. Eng.* **2010**, *31*, 89–97.
34. Arlinger, J. (Skogforsk, Upsalla Science Park, Upsalla, Sweden). Personal communication, 13 August 2018.
35. Husch, B.; Beers, T.W.; Kershaw, J.A., Jr. *Forest Mensuration*, 4th ed.; John Wiley and Sons: New York, NY, USA, 2003; p. 443, ISBN 978-0-471-01850-6.
36. BW-HKS. *Gesetzliche Handelsklassensortierung für Rohholz (Forst-HKS) mit Ergänzungsbestimmungen für BadenWürttemberg*; Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten: Stuttgart, Germany, 1983; p. 25.
37. Wojnar, T. *Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v ČR 2008*, 2nd ed.; Lesnická práce s.r.o.: Kostelc nad Černými lesy, Czech Republic, 2007; p. 147, ISBN 978-80-87154-01-4.
38. Hamilton, G.J. *Forestry Commission Boklet No. 39—Forest Mensuration Handbook*; HMSO: London, UK, 1975; p. 274, ISBN 0-11-710023-4.
39. Labelle, E.R.; Soucy, M.; Cyr, A.; Pelletier, G. Effect of Tree Form on the Productivity of a Cut-to-Length Harvester in a Hardwood Dominated Stand. *Croat. J. For. Eng.* **2016**, *37*, 175–183.
40. Spinelli, R.; Magagnotti, N.; Schweier, J. Trends and Perspectives in Coppice Harvesting. *Croat. J. For. Eng.* **2017**, *38*, 219–230.
41. Karaszewski, Z.; Łacka, A.; Mederski, P.S.; Noskowiak, A.; Bembenek, M. Damage caused by harvester head feed rollers to alder, pine and spruce. *Drewno* **2016**, *59*, 77–88.
42. Strandgard, M. Evaluation of Manual Log Measurement Errors and Its Implications on Harvester Log Measurement Accuracy. *Int. J. For. Eng.* **2009**, *20*, 9–16. [CrossRef]
43. Nieuwenhuis, M.; Dooley, T. The effect of calibration on the accuracy of harvester measurements. *Int. J. For. Eng.* **2006**, *17*, 25–33. [CrossRef]
44. Marshall, H.D.; Murphy, G.E.; Lachenbruch, B. Effects of bark thickness estimates on optimal log merchandising. *For. Prod. J.* **2006**, *56*, 87–92.
45. Gendek, A.; Wezyk, P.; Moskalik, T. Share and accuracy of estimation of logging residues in the total volume of harvested timber. *Sylwan* **2018**, *162*, 679–687.

© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

5.4 Další publikované články

Tyto články se také zabývají výrobně-evidenčním softwarem harvestorů, ale nejsou přímo propojeny s cíli v zadání disertační práce. Dizertant je jejich spoluautorem.

Dvořák, J., Löwe, R., Natov, P., Jankovský, M., **Sedmíková, M**. Unrecorded volume of Norway spruce timber in cut-to-length harvesting. *Scandinavian Journal of Forest Research* 2020, 35(7), 383–393. https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1815829

Článek s názvem „Neevidovaný objem smrkového dříví při výrobě dříví sortimentní těžební metodou.“ Tento výzkum navazuje na třetí článek z této disertační práce a věnuje se určení podílu neevidovaného objemu dříví, faktické ztrátě, která vzniká jako přídavek k délce výřezů při výrobě smrkového dříví pomocí harvestorové technologie.

Löwe, R., **Sedmíková, M**., Natov, P., Dvořák, J., Jankovský, M. *Analýza neevidovaného objemu dříví v přídavcích k délce výřezů při výrobě smrkového dříví harvestorovou technologií*. *Zprávy lesnického výzkumu*, 2019, 64(4):207-216, *https://www.vulhm.cz/files/uploads/2020/01/577.pdf*

Článek se zaměřuje na stanovením podílu neevidovaného objemu dříví v přídavcích k délce výřezů (nadměrky a řezací okno) při výrobě smrkového dříví harvestorovou technologií. Cílem studie bylo určit tyto podíly na celkovém objemu obchodovatelného dříví a také ve skupinách sortimentů. Výsledky mohou být využity pro stanovení neregistrovaného objemu dříví v přídavcích k délce a doplnění záznamů lesního hospodářské evidence.

6 Diskuze

V roce 2022 bylo těženo harvestory 45 % z celkového ročního objemu dříví vyrobeného v ČR (MZe, 2023). I když se struktura lesních porostů po kůrovcové kalamitě a s ohledem na měnící se přírodní podmínky v důsledku klimatických změn pomalu mění, harvestorová technologie má a bude mít v českém lesním hospodářství své významné zastoupení. Přestože lesníci usilují o zakládání pestřejších lesů s vyšším podílem listnatých dřevin, faktory, jako vhodné terénní podmínky v ČR, nedostatek lesních dělníků pracujících s motorovými pilami nebo koňmi, rozvoj využití harvestorů ve výchovných těžbách a stále významný podíl jehličnanů v lesních porostech v ČR naznačují, že harvestory budou i nadále běžně využívanou technologií v těžbě dříví v budoucnu. V budoucnu nelze vyloučit i vyšší používání harvestorové technologie v listnatých lesních porostech nebo v porostech s vyšším zastoupením listnáčů, neboť je snaha projektantů stále více přizpůsobovat mechanizaci, především konstrukci těžebních hlavic, těmto výrobním podmínkám (Mederski et al., 2022).

Česko se stalo epicentrem kůrovcové kalamity v Evropě. Lýkožrout smrkový (*Ips typographus*) poškodil v letech 2017-2019 ročně 3,1–5,4 % porostní zásoby smrkových lesních porostů (Hlásny, Zimová, et al., 2021). Kůrovcová kalamita dosáhla vrcholu v roce 2020, kdy celkový roční objem těžby dříví v ČR dosáhl 35,75 milionů m^3 (MZe, 2023). V současné době kalamita ustupuje a české lesnictví se pomalu vrací do předkalamitního stavu, který v objemu těžby představuje 15-18 milionů m^3 dříví ročně. Riziko další kůrovcové kalamity však přetrvává. Do budoucna se předpokládá, že kůrovcové kalamity budou v oblastech o rozloze stovek kilometrů probíhat synchronně v důsledku extrémních klimatických jevů, jako jsou vlny veder a sucha (Allen et al., 2015; Hlásny, Merganičová, et al., 2021). V době propuknutí kůrovcové kalamity nebyla věnována velká pozornost výcviku operátorů harvestorů. Nyní je však ten správný čas zvážit na národní úrovni stanovení požadavků na vzdělání obsluhy těchto strojů. Zázemí pro to již existuje, ať již ve formě státních či soukromých vzdělávacích center (např. moderní školicí středisko pro obsluhu operátorů harvestorů v Trutnově spravované Českou lesnickou akademií Trutnov nebo školící centrum firmy Merimex s.r.o.), tak ve formě odborných publikací (např. Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018 (Natov & Dvořák, 2018)). Odborně vyškolená obsluha zajistí maximální využitelnost těchto strojů – jejich efektivitu, správné používání s ohledem na

ochranu lesního prostředí a plnění všech funkcí lesa a spolehlivost a transparentnost výstupních dat produkce dříví.

Proto je důležité detailně znát funkce výrobně-plánovacích, výrobně-evidenčních a výrobně-logistických softwarů harvestorů, možnosti jejich nastavení a rozumět výstupům, které nám poskytují, především o produkci dříví. Publikované vědecké články potvrdily, že objemy dříví s kůrou, stanovené podle typu ceny M3toDE, byly podhodnoceny oproti referenčnímu typu ceny M3s. V případě modřínového dříví (druhý článek) byl tento rozdíl 5,59 % (u kulatiny 5,99 %), pro srovnání u smrku (třetí článek) byl zjištěn rozdíl 5,67 %. Protože se však ve střední Evropě, na základě specifického historického vývoje lesního hospodářství v ČR, standardně používá stanovení objemu dříví podle Huberova vzorce, preferujeme pro evidenci produkce dříví a obchodování v softwarovém nastavení typ ceny M3toDE nebo M3miDE (používají stejný algoritmus pro stanovení objemu). Dříví se prodává s kůrou, ale obchodovatelný objem je udáván bez kůry. V systému harvestoru lze použít pouze pásmové nebo parametrické lineární modely odpočty kůry (polynom není podporován softwarem).

6.1 Objem dříví s kůrou a bez kůry u modřínu

Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018 (Natov & Dvořák, 2018) umožňují zadat pásmový odpočet nebo parametrický (lineární) odpočet pro určení dvojnásobné tloušťky kůry, obě metody sestavené podle modelu VAL (Valenta, 2015). Valenta (2015) zkonstruoval polynomickýmodel pro odpočet kůry modřínu na základě měření kůry modřínových kmenů na různých místech v ČR. Výsledky této studie ukázaly, že odhadovaný podkorní objem při použití metody odečtu kůry VAL (Valenta, 2015) byl pouze o 0,25 % menší než při použití pásmového odpočtu kůry a o 0,66 % větší než při použití odpočtu lineáním modelem. Je tak možné použít obě metody, které jsou podle Natova a Dvořáka (2018) uvedeny v Doporučených pravidlech pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018. Pro obsluhu harvestoru může být jednodušší použít lineární odpočet při nastavování výroby sortimentů pro modřín, protože se zadávají pouze dvě hodnoty. Výsledky ukazují, že objemy modřínového řeziva bez kůry byly výrazně odlišné při použití Doporučených pravidel pro měření a třídění dříví v ČR 2008 (Wojnar, 2007) a Tabulek a polynomů pro výpočet objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře (Černý & Pařez, 2009). Objem dle VAL byl o 6,6 % vyšší oproti Doporučeným pravidlům pro měření a třídění dříví v ČR 2008 (Wojnar, 2007), naopak

o 6,3 % nižší oproti Tabulkám a polynomům pro výpočet objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře (Černý & Pařez, 2009). Rozdíly jsou způsobeny tím, že pro odpočet kůry modřínu se v případě Doporučených pravidel pro měření a třídění dříví v ČR 2008 (Wojnar, 2007) používají tabulky pro odečet kůry kmenů borovice lesní, stejně tak v případě Tabulek a polynomů pro výpočet objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře (Černý & Pařez, 2009). Rozdíl je však způsoben tím, že Wojnar (2007) využívá pro odpočet kůry modřínu tabulky pro oddenkové výřezy borovice, zatímco Černý a Pařez (2009) tabulky pro běžné výřezy borovice, tzv. borovice – kůra. Valenta (2015) zjistil, že pouze u krátkých oddenkových výřezů o délce 2 m byla tloušťka modřínové kůry stejná nebo větší než u borových kmenů. Použití těchto modelů pro modřín v lesním hospodářství může vést k nepřesnostem a obchodním sporům.

6.2 Objem dříví s kůrou a bez kůry u borovice

Celkový objem dříví bez kůry všech vyrobených výřezů borovice lesní stanovený podle typu ceny M3s byl o 6,48 % vyšší než celkový objem stanovený podle typu ceny M3toDE. Signifikantní rozdíl byl také zjištěn u průměrných objemů výřezů bez kůry stanovených prostřednictvím typů cen M3s a M3toDE, a to jak u všech výřezů dohromady, tak u jednotlivých skupin sortimentů. Podobné výsledky byly zjištěny i ve třetím článku, při analýze kmenů smrku ztepilého. Zjištěný rozdíl mezi celkovými objemy těchto dvou typů cen byl 5,67 %, statisticky významný rozdíl byl zjištěn ve skupinách sortimentů kulatiny, vlákniny i palivového dříví.

U oddenkových výřezů jsme zjistili, že rozdíl mezi objemy M3toDE s kůrou a bez kůry byl největší při použití lineárního odpočtu a nejmenší při použití pásmového odpočtu. Přestože byl statisticky významný rozdíl mezi lineárním odpočtem a odpočtem kůry dle Wojnara (2007), relativní rozdíl mezi těmito metodami byl pouze 0,93 % z celkového objemu kůry. Ve srovnání s ostatními kmeny borovice lesní s normální kůrou byl také rozdíl mezi objemem s kůrou a bez kůry největší při použití lineárního odpočtu a nejmenší při použití pásmového odpočtu, zatímco relativní rozdíl mezi lineárním odpočtem a odpočtem dle Wojnara (2007) byl výrazně vyšší a dosáhl 2,82 %. Podle výsledků některých studií může kůra tvořit 6 % až 20 % celkového objemu výřezu (Cellini et al., 2012; Wehenkel et al., 2012). Liepiņš a Liepiņš (2015) zjistili, že průměrný podíl kůry na kmeni borovice lesní se pohybuje od 5,5 % do 34,5 %. Tento rozptyl lze vysvětlit především vlivem stáří stromu a jeho velikosti. Tloušťku kůry ovlivňuje také

podnebí, tvar a forma kmene, kvalita stanoviště, zeměpisná šířka a další aspekty (Laasasenaho et al., 2005; Sonmez et al., 2007; Wilhelmsson et al., 2002). Existuje také několik variant struktury kůry borovice lesní (Jelonek et al., 2009).

Při použití pásmového odpočtu kůry a parametrického lineárního odpočtu kůry lineárním modelem se používají různé parametry pro výřezy s hrubou kůrou (oddenkové kusy) a ostatní výřezy s normální tloušťkou kůry. V této studii byly tyto metody aplikovány na jednotlivé kmeny, aby se prokázaly rozdíly v tloušťce kůry. V praxi se však po pokácení stromu musí operátor harvestoru rozhodnout, zda zvolí odpočet kůry pro borovice-borka nebo borovice-kůra, a pak se tento typ používá pro všechny výřezy vyrobené z kmene. Výrobně-evidenční software harvestorů neumožňuje volit parametry odpočtu kůry pro každý kmen. Pro získání spolehlivých výstupů z harvestorů je nutné provádět pravidelná kontrolní měření a v případě potřeby kalibraci harvestoru.

Chceme-li mít srovnatelné stanovení objemů výřezů borovice lesní vyrobené harvestory se stanovením objemů dříví bez kůry podle DPD (Wojnar, 2007), měli bychom z DPE (Natov & Dvořák, 2018) preferovat využití pásmového odpočet kůry před parametrickým lineárním odpočtem. Protože využití parametrického odpočtu kůry s lineární funkcí je jednodušší a šetří operátorovi čas, můžeme zvažovat využití této metody u oddenkových výřezů s hrubou kůrou (borovice-borka), u kterých byl rozdíl mez těmito metodami nižší než 1 %. Je však důležité poznamenat, že srovnávané stávající metody odhadu dvojité tloušťky kůry jsou založeny na databázi dat, která byla shromažďována na našem území v 70. letech 20. století. Jako doporučení pro další výzkumy se proto jeví jako vhodné aktualizovat tuto databázi dat pro růstové podmínky ČR, neboť např. Stängle & Dormann (2018) a Stängle et al. (2017) zjistili, že produkce kůry ze stromů v Německu se v podobném časovém úseku snížila.

6.3 Typy cen a jejich algoritmy pro stanovení objemu

U třetího článku, který se zabýval porovnáváním objemů smrkového dříví stanovených dle různých algoritmů, byly veškeré hodnoty objemů vyjádřeny v metrech krychlových s kůrou. Tento přístup pomáhá předejít potenciálním nepřesnostem, které by mohly vzniknout z použití různých metod odpočtu kůry při stanovení objemu dříví bez kůry.

Výsledky ukázaly statisticky významné rozdíly mezi objemy stanovenými různými algoritmy používanými ve výrobně-evidenčním systému harvestorů. Skogforsk

(2012b) uvádí, že objem stanovený Algoritmem A2 (typ ceny M3s a Log) by měl být nejblíže skutečnému objemu výřezu. Nicméně ani tento algoritmus pro stanovení objemu není absolutně přesný, podle Hohmanna a kol. (2017) harvestory podhodnocují objem kmenů v průměru o -0,45 % ve srovnání s technikou ponoření výřezů do vody.

Největší rozdíl byl mezi Algoritmem A2 a Algoritmem A1(M3to, M3tos), a to kvůli parametrům, které A1 používá k stanovení objemu. Algoritmus A1 určuje objem výřezu na základě výpočtu objemu výřezu ve tvaru válce a jako hodnotu tloušťky používá čepovou tloušťku. Čepová tloušťka je přirozeně nejmenší hodnotou, kterou lze použít, což vede k výraznému podhodnocení objemu výřezu, a proto je tento algoritmus nevhodný pro zjišťování skutečného objemu. Je pravděpodobné, že algoritmus A1 nebyl zamýšlen k přesnému určení skutečného objemu výřezů, ale spíše k stanovení objemu, který je využitelný při pilařském zpracování stromů celých délek.

Druhý největší rozdíl byl zjištěn mezi algoritmem A2 a algoritmem A5 (M3toDE, M3miDE). Podle algoritmu A5 se objem výřezu stanovuje na základě střední tloušťky v milimetrech, přičemž tento průměr je vždy zaokrouhlen na nejbližší celý centimetr. To odpovídá metodě HKS (BW-HKS, 1983). Tento velký rozdíl je zajímavý, protože algoritmus A5 je používán v typech cen M3toDE a M3miDE, které se uplatňují v zemích střední Evropy, jako jsou Německo, Česká republika, Rakousko, Slovensko a Maďarsko. Například v České republice jsou tyto typy cen upřednostňovány, protože zajišťují, že objem dříví registrovaný harvestorem bude srovnatelný s objemem dříví stanoveným podle DPD (Wojnar, 2007), které zároveň představují uznávaný národní standard pro krychlení dříví. Tímto způsobem se však výrazně podhodnocuje objem vyprodukovaného dříví oproti skutečnému objemu dříví.

Zajímavé je také porovnat výsledky objemů stanovených pomocí algoritmu A5 a algoritmu A6 (M3smimi, M3sm). Tyto dvě metody se odlišují v jednom zásadním aspektu. Algoritmus A6 nevyžaduje zaokrouhlování středové tloušťky na celé centimetry, protože není založen na metodě HKS. Pro stanovení objemu se tak používá přímo měřená střední tloušťka v milimetrech. Takto stanovený objem snížil chybu přibližně o polovinu, na 3,18 % (1069,44 m^3). Proto je výhodnější používat přesné naměřené hodnoty tloušťky, které z elektronického měření umožňují evidovat harvestory, a ne je při výpočtu objemu zaokrouhlovat.

Algoritmy A4 (M3tobutt) a A7 (M3sEST) ukázaly rozdíl v stanoveném objemu dříví menší než 3 % ve srovnání s algoritmem A2, oba tyto algoritmy používají pro stanovení objemu výřezů rovnice. Algoritmus A4 používá k výpočtu objemu rovnici obsahující parametr "a", jehož hodnota se liší podle délky výřezu a čepové tloušťky. Algoritmus A7 pracuje také s čepovou tloušťkou a dále používá tzv. konické faktory, jejichž hodnota se mění v závislosti na druhu dřeviny (Skogforsk, 2012b). Pokud bychom stanovovali objemy výřezů u jiných dřevin než smrku ztepilého, mohl by se rozdíl oproti algoritmu A2 lišit.

Algoritmus A3 (M3sNO, LogNO) se ukázal jako nejbližší k algoritmu A2. Zaznamenaný rozdíl byl nejmenší a byl jediný statisticky nevýznamný. Algoritmus A3 stanovuje objem výřezů na základě válce s teoretickou středovou tloušťkou výřezu a délkou zaokrouhlenou na nejbližší celé decimetry. Tloušťka použitá pro určení teoretické středové tloušťky byla ve skutečnosti měřena 10 cm od čepu výřezu. Tato naměřená tloušťka byla navíc zaokrouhlena na nejbližší celý centimetr. Výpočet teoretické středové tloušťky byl založen na standardní sbíhavosti tzv. „plnodřevnosti“ (úbytek 1 cm tloušťky na 1 m délky). Tato sbíhavost odpovídá tomu, co uvádí Hamilton (1975) pro pilařské výřezy. Kvůli předchozímu zaokrouhlování se k vypočtené teoretické středové tloušťce připočte 0,5 cm. Poté se k určení objemu výřezu použije Huberova metoda (Husch et al., 2003). Algoritmus A3 se tedy ukazuje jako nejvhodnější náhrada za algoritmus A2. Nicméně, při zaměření na jednotlivé skupiny sortimentů zjistíme, že mezi objemy vypočtenými těmito dvěma algoritmy existují významné rozdíly. Nejmenší rozdíl byl zaznamenán ve skupině sortimentů Kulatina.

Při analýze rozdílů mezi sortimenty bylo obzvláště zajímavé zaměřit se na skupinu Kulatina. Tato skupina totiž představovala nejen největší celkový objem dříví, ale také nejcennější obchodovatelné výřezy. Výsledky ukázaly, že stanovení objemu různými algoritmy se výrazně lišily. Ve srovnání s celkovou odchylkou, tedy aniž by byly výřezy rozděleny do jednotlivých skupin sortimentů, se rozdíl mezi objemy stanovenými algoritmem A2 a algoritmem A5 zvýšil o 0,38 %, na celkových 6,05 %. Výsledek tak ukázal nárůst rozdílu v objemu při výrobě nejhodnotnějších sortimentů. Algoritmus A5 se v některých středoevropských zemích používá k evidenci výroby kulatiny. V případě, že bychom chtěli harvestorové výstupy využít k prodeji dříví, přišli bychom o více než 6 % skutečného objemu dříví, což by znamenalo značnou finanční ztrátu.

Je důležité však poznamenat, že výsledné objemy dříví srovnávané v této studii nelze srovnávat se skutečným celkovým objemem kulatiny, protože objemy dříví v této studii nezahrnují objem přídavku ke jemnovité délce a objem řezacího okna. Přídavek k délce znamená přidání délky k některým sortimentům pro příčné nebo jiné zpracování a řezací okno zajišťuje toleranci řezného bodu měřicích snímačů harvestoru, což zvyšuje výkon stroje. V ČR je doporučený přídavek k délce 2 % jmenovité délky výřezu a doporučené řezací okno v rozmezí od 0 cm do maximálně 4 cm (Natov & Dvořák, 2018). Celkový objem vyrobeného dříví se také liší od objemu dřeva stromů nastojato, protože neobsahuje podíl objemu těžebních zbytků (Gendek et al., 2018).

7 Závěr a doporučení pro praxi

Cíle stanovené v této disertační práci byly splněny. Cílům (i) „Analýza typů cen a metod odpočtu kůry popsaných ve standardu StanForD, určení rozdílů mezi těmito nastavitelnými parametry a doporučení vhodného nastavení těchto parametrů ve výrobně-evidenčním softwaru harvestorů pro využití v podmínkách lesního hospodářství České republiky“ a (ii) „Porovnání objemů výřezů s kůrou a bez kůry stanovených dle vybraných typů cen a metod odpočtu kůry při výrobě dříví harvestorovou technologií, včetně analýzy objemových rozdílů mezi jednotlivými vyráběnými skupinami sortimentů u vybraných druhů jehličnatých dřevin“ se věnovaly články 1, 2 a 3, cíli (iii) „Analýza vhodnosti využití lineární metody pro odpočet objemu kůry, sestrojené pro růstové podmínky dřevin v ČR, ve výrobně-evidenčním softwaru stroje v porovnání s metodou pásmových srážek pro odpočet tloušťky kůry u vybraných druhů jehličnatých dřevin“ články 1 a 2.

Stanovení objemu kmenů borovice lesní bez kůry prostřednictvím typu ceny M3toDE vedlo k výraznému podhodnocení ve srovnání s referenčním typem ceny M3s. U modřínového dříví tento rozdíl dosáhl 5,59 % (u skupiny sortimentů Kulatina 5,99 %). Nicméně pro použití v českém lesnictví je kvůli standardizovaným postupům pro měření dříví na základě Huberova vzorce momentálně nutné používat typ ceny M3toDE. U borovice přibližně 20 % objemu oddenkových výřezů tvořila kůra, zatímco u ostatních borovicových výřezů to bylo méně než 10 %. Studie ukázaly, že parametrická metoda s lineární funkcí pro odpočet kůry poskytuje odlišné výsledky ve srovnání s referenčním stanovením dle Wojnara (2007), zatímco rozdíly u pásmového odpočtu nebyly významné. Proto důrazně doporučujeme používat pásmový odpočet pro srovnání výstupů harvestoru s metodami v DPD (Wojnar, 2007). Pokud budeme trvat na nastavení parametrů z lineárního modelu pro odpočet kůry, jelikož je jednodušší a časově úspornější, lze jej využít u porostů borovice s hrubší kůrou.

Výzkum také odhalil významné rozdíly v objemech výřezů stanovených různými algoritmy používanými ve výrobně-evidenčních softwarech harvestorů. Pro správnou evidenci a využití výstupů z harvestorů k prodeji dříví je nutné rozlišovat, jak byly objemy vypočítány. Zjistilo se, že algoritmus A1 je nevhodný pro evidování objemů výřezů, zatímco mezi algoritmy A2 a A3 nebyly zjištěny významné rozdíly. Algoritmus A5 vykazoval o více než 6 % nižší objem u smrkového kulatinového dříví než algoritmus

A2, což je důležité pro země střední Evropy, kde se tento algoritmus používá. Abychom získali co nejpřesnější objem dříví, je nutné využívat algoritmus A2. Tento algoritmus však není aktuálně v souladu se standardy pro krychlení dříví v ČR. Pro porovnatelnost výstupů s aktuálně využívanými pravidly k obchodování se dřívím (Wojnar, 2007), je třeba využívat algoritmus A5. Tyto výsledky zdůrazňují potřebu pravidelných kontrolních měření systémů harvestorů a případné kalibrace, aby byly výstupy evidence dříví důvěryhodné a validní. Výsledky studie mohou sloužit k lepšímu pochopení fungování softwarů harvestorů a optimalizaci jejich využití v lesnické praxi.

Výsledky těchto výzkumů jsou využitelné v lesnické praxi. Podrobné znalosti ovládání harvestorů a jejich výrobně-evidenčních a výrobně-plánovacích softwarů jsou v současnosti pro operátory těchto strojů nezbytné a zajistí přesnější měření dříví. Bez těchto znalostí není možné zajistit správné a efektivní využití harvestorové technologie ve spojitosti s evidencí výroby dříví v českých lesích, které v posledních letech zažily masivní kůrovcovou kalamitu a nyní jsou přeměňovány na rozmanitější lesy s využitím přírodě blízkých lesnických postupů. Pro lesnickou praxi je také důležité věnovat pozornost dílčím tématům, jako je například zpracování modřínového dříví a možnost stanovení jeho objemu s kůrou a bez kůry. Při obchodování s modřínovým dřívím to může pomoci maximalizovat ekonomický efekt, jelikož jeho cena je vyšší ve srovnání s jinými hospodářsky významnými jehličnany (smrk, borovice, jedle). Z tohoto důvodu musí operátor stroje správně určit druh stromu a mít vhodně nastavený algoritmus pro výrobu sortimentů (včetně typu ceny a metody odpočtu kůry). Výsledky publikovaných článků pomohou zvýšit informovanost o možnostech nastavení výrobně-evidenčního systému a při jejich aplikaci do v budoucnu možném povinném školení pro operátory harvestoru, přispějí k validitě elektronického příjmu dříví harvestory. V dalších studiích je nutné se zaměřit na další dílčí témata efektivního využití softwaru harvestorů, například problematiku neevidovaného objemu vyráběného dříví.

Výsledky tohoto výzkumu mají pozitivní dopad na lesnickou praxi tím, že umožní přesnější měření dříví zpracovávaného pomocí harvestorů. To povede k lepšímu využití dřevní suroviny, minimalizaci ztrát a zvýšení efektivity při těžbě a zpracování dříví. Tyto změny mohou přinést větší ekonomickou efektivitu i udržitelnost lesního hospodářství.

8 Seznam použitých zkratek

CTL	cut-to-length - sortimentní metoda těžby
ČR	Česká republika
DPD	Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v ČR 2008 (Wojnar, 2007)
DPE	Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018 (Natov & Dvořák, 2018)
ha	hektar
HKS	Handelsklassensortierung, třídění obchodovatelného dříví
m n. m.	metry nad mořem
m^3	metr krychlový
MZe	Ministerstvo zemědělství ČR
StanForD	Standard for Forest Machine Data and Communication
TaP	Tabulky a polynomy pro výpočet objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře (Černý & Pařez, 2009)
VAL	polynomický model pro odpočet kůry modřínu (Valenta, 2015)

9 Seznam tabulek a obrázků

Seznam tabulek

Tabulka 1: Typy cen, které používá StanForD pro výpočet objemu a jejich popis (Skogforsk, 2012; Natov, Dvořák, 2018). 32
Tabulka 2: Parametry funkce při odpočtu na kůru. 40
Tabulka 3: Parametry lineální funkce sestavené Natovem a Dvořákem (2018) pro srážku kůry dle standardu StanForD 41

Seznam obrázků

Obrázek 1: Mapa rozšíření modřínu opadavého v Evropě 29
Obrázek 2: Princip stanovení objemu dříví podle typů cen M3s a M3toDE. Objem stanovený pomocí typu ceny M3s vychází ze stanovení dílčích objemů 10 cm dlouhých úseků (segmentů), které se následně sečtou. Naproti tomu typ ceny M3toDE stanovuje objem na základě středové tloušťky (MD) kmene zaokrouhleného dolů na nejbližší celý centimetr. Oba typy cen vyjadřují objem výřezu pomocí jeho jmenovité délky (RL). 34

10 Seznam citované literatury

Acuna, M. A., & Kellogg, L. D. (2009). Evaluation of Alternative Cut-to-Length Harvesting Technology for Native Forest Thinning in Australia. *International Journal of Forest Engineering*, *20*(2), 17–25. https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702579

Adams, P. W., & Froehlich, H. A. (1981). *Compaction of Forest Soils* (Issue December). A Pacific Northwest Extension Publication Oregon •.

Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, *6*(8), 1–55. https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1

Andersson, B., & Dyson, P. (2002). *Evaluating the Measuring Accuracy of Harvesters and Processors* (Advantage). Forest Engineering Research Institute of Canada. British Columbia. Forest Practices Branch.

Andersson, S. (2004). Skogsteknik förr och nu (Forest technology past and present). In *Skogshistoriska Sällskapets Årsskrift*. The Swedish Society of Forest History.

Apăfăian, I. A., Proto, A. R., & Borz, S. A. (2017). Performance of a mid-sized harvester-forwarder system in integrated harvesting of sawmill, pulpwood and firewood. *Annals of Forest Research*. https://doi.org/10.15287/afr.2017.909

Arlinger, J., & Möller, J. (2010). Introduction to StanForD 2010. *Skogsforsk*, *February*, 99.

Ashton, M. S., & Kelty, M. J. (2018). The practice of silviculture: Applied forest ecology (10th edition) overview. In *The Practice of Silviculture: Applied Forest Ecology. , J.W. Wiley & Sons, New York* (Vol. 76, Issue March).

Atha, D. E., Romero, L., & Forrest, T. (2005). Bark volume determination of Bursera simaruba in Belize. *Caribbean Journal of Science*, *41*(4), 843–848.

Auty, D., Achim, A., Macdonald, E., Cameron, A. D., & Gardiner, B. A. (2014). Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry*, *87*(3), 449–458. https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005

Avery, T. E., & Burkhart, H. E. (2002). *Forest Measurements*. McGraw-Hill. https://books.google.cz/books/about/Forest_Measurements.html?id=GTJGAAAACAAJ&redir_esc=y

Axelsson, S.-Ă. (1998). The Mechanization of Logging Operations in Sweden and its Effect on Occupational Safety and Health. *Journal of Forest Engineering*, *9*(2), 25–31. https://doi.org/10.1080/08435243.1998.10702715

Bembenek, M., Mederski, P. S., Karaszewski, Z., Łacka, A., Grzywiński, W., Węgiel, A., Giefing, D. F., & Erler, J. (2015). Length accuracy of logs from birch and aspen harvested in thinning operations. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, *39*(6), 845–850. https://doi.org/10.3906/tar-1406-39

Berrill, J.-P., O'Hara, K. L., & Kichas, N. E. (2020). Bark Thickness in Coast Redwood (Sequoia sempervirens (D.Don) Endl.) Varies According to Tree- and Crown Size, Stand Structure, Latitude and Genotype. *Forests*, *11*(6), 637. https://doi.org/10.3390/f11060637

Bigot, M., & Cuchet, E. (2003). Mechanized harvesting system for hardwoods. In M. Iwarsson Wide & B. Baryd (Eds.), *SkogForsk. 2nd Forest Engineering Conference, Växjö, Sweden* (pp. 1–10).

Billingsley, J., Visala, A., & Dunn, M. (2008). Robotics in Agriculture and Forestry. In *Springer Handbook of Robotics* (pp. 1065–1077). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_47

Błuszkowska, U., & Nurek, T. (2014). Effect of mechanization level on manpower needs in forestry. *Folia Forestalia Polonica*, *56*(4), 194–201. https://doi.org/10.2478/ffp-2014-0022

Böhm, P., Wolterbeek, H., Verburg, T., & Musílek, L. (1998). The use of tree bark for environmental pollution monitoring in the Czech Republic. *Environmental Pollution*, *102*(2–3), 243–250. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(98)00082-7

Bonyad, A. E., Sima, A., Bakhshandeh, A., & Dadras, H. (2012). Evaluation of non-destructive Meyer method for determination of bark volume of beech (Fagus orientalis Lipsky) in different geographical aspects. *Caspian J. Env. Sci.*, *10*(1), 67–73.

Borz, S. A., Secelean, V.-N., Iacob, L.-M., & Kaakkurivaara, N. (2023). Bucking at Landing by a Single-Grip Harvester: Fuel Consumption, Productivity, Cost and Recovery Rate. *Forests*, *14*(3), 465. https://doi.org/10.3390/f14030465

Bottero, A., Garbarino, M., Long, J. N., & Motta, R. (2013). The interacting ecological effects of large-scale disturbances and salvage logging on montane spruce forest regeneration in the western European Alps. *Forest Ecology and Management*, *292*, 19–28. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.021

Braghiroli, F. L., & Passarini, L. (2020). Valorization of Biomass Residues from Forest Operations and Wood Manufacturing Presents a Wide Range of Sustainable and Innovative Possibilities. *Current Forestry Reports*, *6*(2), 172–183. https://doi.org/10.1007/s40725-020-00112-9

Brickell, J. E. (1970). *Test of an equation for predicting bark thickness of Western Montana species* (RN-INT-107). USDA Forest Service.

Brown, N. C. (1949). *Logging;: The principles and methods of harvesting timber in the United States and Canada*. John Wiley & Sons/Chapman & Hall.

Buras, A., & Menzel, A. (2019). Projecting Tree Species Composition Changes of European Forests for 2061–2090 Under RCP 4.5 and RCP 8.5 Scenarios. *Frontiers in Plant Science*, *9*. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01986

BW-HKS. (1983). *Gesetzliche Handelsklassensortierung für Rohholz (Forst-HKS) mit Ergänzungsbestimmungen für BadenWürttemberg*. Ministerium für Ländlichen Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten.

Cambi, M., Certini, G., Neri, F., & Marchi, E. (2015). The impact of heavy traffic on forest soils: A review. *Forest Ecology and Management*, *338*, 124–138. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2014.11.022

Cao, T., Hyytiäinen, K., Hurttala, H., Valsta, L., & Vanclay, J. K. (2015). An integrated assessment approach to optimal forest bioenergy production for young Scots pine stands. *Forest Ecosystems*, *2*(1), 19. https://doi.org/10.1186/s40663-015-0043-6

Cellini, J. M., Galarza, M., Burns, S. L., Martinez-Pastur, G. J., & Lencinas, M. V. (2012). Equations of bark thickness and volume profiles at different heights with easy-

measurement variables. *Forest Systems*, *21*(1), 23–30. https://doi.org/10.5424/fs/2112211-01963

Černý, M., & Pařez, J. (2009). *Tabulky a polynomy pro výpočet objemu kulatiny bez kůry podle středové tloušťky měřené v kůře*. Lesnická práce: Kostelec nad Černými lesy.

Cochran, P. H. (1976). *Predicting wood volumes for ponderosa pine from outside bark measurements*. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service, U.S. Dept. of Agriculture,. https://doi.org/10.5962/bhl.title.70622

Costa, A., Barbosa, I., Pestana, M., & Miguel, C. (2020). Modelling bark thickness variation in stems of cork oak in south-western Portugal. *European Journal of Forest Research*, *139*(4), 611–625. https://doi.org/10.1007/s10342-020-01273-9

Costa, E. A., Liesenberg, V., Finger, C. A. G., Hess, A. F., & Schons, C. T. (2021). Understanding bark thickness variations for Araucaria angustifolia in southern Brazil. *Journal of Forestry Research*, *32*(3), 1077–1087. https://doi.org/10.1007/s11676-020-01163-1

Dale, V. H., Joyce, L. A., McNulty, S., Neilson, R. P., Ayres, M. P., Flannigan, M. D., Hanson, P. J., Irland, L. C., Lugo, A. E., Peterson, C. J., Simberloff, D., Swanson, F. J., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2001). Climate change and forest disturbances. *BioScience*, *51*(9), 723–734. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0723:CCAFD]2.0.CO;2

Diéguez Aranda, U., Barrio Anta, M., Castedo Dorado, F., Ruiz González, A. D., Álvarez Taboada, M. F., Álvarez González, J. G., & Rojo Alboreca, A. (2003). *Dendrometría*. Mundi-Prensa. https://minerva.usc.es/xmlui/handle/10347/31041

Dooley, T., Layton, T., & Nieuwenhuis, M. (2006). The impact of calibration on the accuracy of harvester measurement of total harvest volume and assortment volume for Sitka spruce clearfells in Ireland The impact of calibration on the accuracy of harvester measurement of total harvest volume and assortme. *Irish Forestry–The Journal of The Society of Irish Foresters*, *6 (1–2)*(July), 96–107.

Doruska, P. F., Patterson, D., Hartley, J., Hurd, M., & Hart, T. (2009). Newer Technologies and Bioenergy Bring Focus Back to Bark Factor Equations. *Journal of Forestry*, *107*(1), 38–43. https://doi.org/10.1093/jof/107.1.38

Drushka, K., & Konttinen, H. (1997). *Tracks in the Forest: The Evolution of Logging Equipment*. Timberjack Group, Harbour Pub Co.

Dutkuner, I., & Koparan, I. (2016). *Kızılçam (Pinus brutia Ten.) ve Karaçam (Pinus nigra Arn. subsp. pallasiana) Kabuk Miktarı ve Kullanım Olanakları*.

Dvořák, J. (2006). *Cvičení z lesnické mechanizace*. Česká zemědělská univerzita v Praze, Powerprint.

Dvořák, J., Bystrický, R., Hošková, P., Hrib, M., Kováč, J., Krilek, J., Natov, P., Natovová, L., & Lieskovský, M. (2012). *Využití harvestorových technologií v hospodářských lesích* (Folia Fore). Lesnická práce: Kostelec nad Černými lesy.

Dvořák, J., Chytrý, M., Natov, P., Jankovský, M., & Beljan, K. (2019). Long-term cost analysis of mid-performance harvesters in Czech conditions. *Austrian Journal of Forest Science*, *136*(4), 351–371.

Dvořák, J., Löwe, R., Natov, P., Jankovský, M., & Sedmíková, M. (2020). Unrecorded volume of Norway spruce timber in cut-to-length harvesting. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *35*(7), 383–393. https://doi.org/10.1080/02827581.2020.1815829

Dvořák, J., & Natov, P. (2016). *Plošný výrobní potenciál pro harvestorovou technologii v ČR k 31. 12. 2015*.

Edwards, P. N. (1998). *Timber Measurement, a field guide*. Forestry Commission Booklet 49.

Eriksson, M., LeBel, L., & Lindroos, O. (2017). The Effect of Customer–Contractor Alignment in Forest Harvesting Services on Contractor Profitability and the Risk for Relationship Breakdown. *Forests*, *8*(10), 360. https://doi.org/10.3390/f8100360

Esteves, B., Sen, U., & Pereira, H. (2023). Influence of Chemical Composition on Heating Value of Biomass: A Review and Bibliometric Analysis. *Energies*, *16*(10), 4226. https://doi.org/10.3390/en16104226

European Commission. (2021). *European Commission. New EU Forest Strategy for 2030.* COM(2021) 572 Final. https://commission.europa.eu/document/cf3294e1-8358-4c93-8de4-3e1503b95201_cs

FAO. (2016). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. Statistics yearbook forest products. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f3f68fa1-00fe-4e9b-be04-24510f8bf264/content

FAO, U. (2020). *The State of the World's Forests 2020*. FAO and UNEP. https://doi.org/10.4060/ca8642en

Fărcaș, S., Tanțău, I., Turtureanu, P. D., Fărcaş, S., Tanţău, I., & Turtureanu, P. D. (2013). Larix decidua Mill. in Romania: current and past distribution, coenotic preferences, and conservation status. *Contributii Botanice*, *48*, 39–50. http://www.cabdirect.org.sci-hub.org/abstracts/20143017062.html;jsessionid=436E2C0D3B2A27D969A8223945F0BF86

Feng, S., Cheng, S., Yuan, Z., Leitch, M., & Xu, C. (Charles). (2013). Valorization of bark for chemicals and materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 560–578. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.06.024

Fengel, D., & Gerd, W. (1983). *Wood* (D. Fengel & G. Wegener, Eds.). DE GRUYTER. https://doi.org/10.1515/9783110839654

Ferrenberg, S., & Mitton, J. B. (2014). Smooth bark surfaces can defend trees against insect attack: resurrecting a 'slippery' hypothesis. *Functional Ecology*, *28*(4), 837–845. https://doi.org/10.1111/1365-2435.12228

Fišer, K., & Provazník, L. (2012). *Měření a příjem dříví. Lesy České republiky– Pokyn výrobně technického ředitele 03/2009*.

Gardner, M. (2013). Pinus Sylvestris, Scots Pine. In *International Union for Conservation of Nature and Natural Resources*.

Gellerstedt, S., & Dahlin, B. (1999). Cut-To-Length: The Next Decade. *International Journal of Forest Engineering*, *10*(2), 17–25.

Gendek, A., Wężyk, P., & Moskalik, T. (2018). Udział oraz dokładność szacowania pozostałości zrębowych w ogólnej masie pozyskanego drewna (Share and accuracy of estimation of logging residues in the total volumeof harvested timber). *Sylwan*, *162*(08), 679–687. https://bibliotekanauki.pl/articles/986464.pdf

Gerasimov, Y., Seliverstov, A., & Syunev, V. (2012). Industrial Round-Wood Damage and Operational Efficiency Losses Associated with the Maintenance of a Single-Grip Harvester Head Model: A Case Study in Russia. *Forests*, *3*(4), 864–880. https://doi.org/10.3390/f3040864

Ghaffariyan, M., Sessions, J., & Brown, M. (2012). Machine productivity and residual harvesting residues associated with a cut-to-length harvest system in southern Tasmania. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, *74*(4), 229–235. https://doi.org/10.2989/20702620.2012.741770

Golubkina, N., Plotnikova, U., Lapchenko, V., Lapchenko, H., Sheshnitsan, S., Amagova, Z., Matsadze, V., Naumenko, T., Bagrikova, N., Logvinenko, L., Sakhno, T., Shevchuk, O., Pirogov, N., & Caruso, G. (2022). Evaluation of Factors Affecting Tree and Shrub Bark's Antioxidant Status. *Plants*, *11*(19), 2609. https://doi.org/10.3390/plants11192609

Gomez, A., Powers, R. F., Singer, M. J., & Horwath, W. R. (2002). Soil Compaction Effects on Growth of Young Ponderosa Pine Following Litter Removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal*, *66*(4), 1334–1343. https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1334

Gregow, H., Laaksonen, A., & Alper, M. E. (2017). Increasing large scale windstorm damage in Western, Central and Northern European forests, 1951–2010. *Scientific Reports*, *7*(1), 46397. https://doi.org/10.1038/srep46397

Hamilton, G. J. (1975). *Forest Mensuration Handbook Forestry Commission Booklet 39*. https://www.forestry.gov.uk/PDF/FCBK039.pdf/$FILE/FCBK039.pdf

Han, S.-K., Han, H.-S., Page-Dumroese, D. S., & Johnson, L. R. (2009). Soil compaction associated with cut-to-length and whole-tree harvesting of a coniferous forest. *Canadian Journal of Forest Research*, *39*(5), 976–989. https://doi.org/10.1139/X09-027

Hartmann, M., Niklaus, P. A., Zimmermann, S., Schmutz, S., Kremer, J., Abarenkov, K., Lüscher, P., Widmer, F., & Frey, B. (2014). Resistance and resilience of the forest soil microbiome to logging-associated compaction. *The ISME Journal*, *8*(1), 226–244. https://doi.org/10.1038/ismej.2013.141

Hatton, B., Gagnol, V., Bouzgarrou, B. C., Fauroux, J.-C., & Gogu, G. (2017). Modelling and simulation of an harvester head mechanism. *Mechanics & Industry*, *18*(3), 309. https://doi.org/10.1051/meca/2016055

Heinimann, H. R. (2000). Forest operations under mountainous conditions. In *Forests in sustainable mountain development: a state of knowledge report for 2000. Task Force on Forests in Sustainable Mountain Development.* (pp. 224–234). CABI Publishing. https://doi.org/10.1079/9780851994468.0224

Heinimann, H. R. (2007). Forest operations engineering and management - The ways behind and ahead of a scientific discipline. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *28*(1), 107–121.

Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T., & Ringdahl, O. (2008). *Autonomous Forest Machines - Past, Present and future*. *UMINF-08.06*.

Hellström, T., Lärkeryd, P., Nordfjell, T., & Ringdahl, O. (2009). Autonomous Forest Vehicles: Historic, envisioned, and state-of-the-art. *International Journal of Forest Engineering*, *20*(1), 31–38. https://doi.org/10.1080/14942119.2009.10702573

Hellström, T., & Ringdahl, O. (2009). Real-Time path planning using a Simulator-In-The-Loop. *International Journal of Vehicle Autonomous Systems*, *7*(1–2), 56–72. https://doi.org/10.1504/ijvas.2009.027967

Hlásny, T., Merganičová, K., Modlinger, R., Marušák, R., Löwe, R., & Turčáni, M. (2021). Prognóza vývoje kůrovcové kalamity a nová platforma pro šíření informací o lesích v České republice. *Zprávy Lesnického Výzkumu*, *66 (3): 197-205*.

Hlásny, T., Zimová, S., Merganičová, K., Štěpánek, P., Modlinger, R., & Turčáni, M. (2021). Devastating outbreak of bark beetles in the Czech Republic: Drivers, impacts, and management implications. *Forest Ecology and Management*, *490*, 119075. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119075

Hogan, J. A., Zimmerman, J. K., Thompson, J., Uriarte, M., Swenson, N. G., Condit, R., Hubbell, S., Johnson, D. J., Sun, I. F., Chang-Yang, C.-H., Su, S.-H., Ong, P., Rodriguez, L., Monoy, C. C., Yap, S., & Davies, S. J. (2018). The Frequency of Cyclonic Wind Storms Shapes Tropical Forest Dynamism and Functional Trait Dispersion. *Forests*, *9*(7), 404. https://doi.org/10.3390/f9070404

Hogg, G., Pulkki, R., & Ackerman, P. (2011). Excavator-based processor operator productivity and cost analysis in Zululand, South Africa. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, *73*(2), 109–115. https://doi.org/10.2989/20702620.2011.610874

Hohmann, F., Ligocki, A., & Frerichs, L. (2017). Harvester measuring system for trunk volume determination: Comparison with the real trunk volume and applicability in the forest industry. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, *10*(October), 27–34.

Holubcik, M., Jandacka, J., Palacka, M., Kantova, N., Jachniak, E., & Pavlik, P. (2017). The Impact of Bark Content in Wood Pellets on Emission Production During Combustion in Small Heat Source. *Communications - Scientific Letters of the University of Zilina*, *19*(2A), 94–100. https://doi.org/10.26552/com.C.2017.2A.94-100

Husch, B., Beers, T. W., & Kershaw, J. A. Jr. (2003). *Forest Mensuration, 4th ed.* John Wiley & Sons. https://doi.org/ISBN 978-0-471-01850-6.

Indra, P. (2002). *Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v České republice*. Pratr, a. s.

Jang, W., Keyes, C. R., & Graham, J. M. (2016). Evaluation of predictive models for Douglas-fir bark thickness at breast height following 12 biomass harvest treatments. *Biomass and Bioenergy*, *84*, 118–123. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.11.015

Jankovský, M., Dvořák, J., Löwe, R., Natov, P., & Nuhlíček, O. (2023). Double Bark Thickness Estimation Models of Common European Broadleaved Species for Harvester Timber Volume Estimation in Czechia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *44*(1), 95–102. https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.1641

Jankovský, M., Natov, P., Dvořák, J., & Szala, L. (2019). Norway spruce bark thickness models based on log midspan diameter for use in mechanized forest harvesting in Czechia. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *34*(7), 617–626. https://doi.org/10.1080/02827581.2019.1650952

JAVŮREK, P., & DVOŘÁK, J. (2018). Evaluation of total time consumption in harvester technology deployment in conditions of the forest sector of the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, *64*(1), 33–42. https://doi.org/10.17221/92/2017-JFS

Jelonek, T., Pazdrowski, W., Arasimowicz-Jelonek, M., Gzyl, J., Tomczak, A., & Floryszak-Wieczorek, J. (2009). The relationship between the form of dead bark and lignin content in Scots pine (Pinus sylvestris L.). *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. https://doi.org/10.3906/tar-0903-42

Jutila, J., Kannas, K., & Visala, A. (2007). Tree Measurement in Forest by 2D Laser Scanning. *2007 International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 491–496. https://doi.org/10.1109/CIRA.2007.382858

Kabeš, A. (2015). *Metodika pro kalibraci těžebních strojů a analýza výstupů dat dle StandForD* [Disertační práce]. Česká zemědělská univerzita v Praze, Praha.

Kalmari, J., Kulovesi, J., & Visala, A. (2011). Measuring Log Length using Computer Stereo Vision in Harvester Head. *IFAC Proceedings Volumes*, *44*(1), 2226–2229. https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.03498

Kamperidou, V., Lykidis, C., & Barmpoutis, P. (2018). Utilization of wood and bark of fast-growing hardwood species in energy production. *Journal of Forest Science*, *64*(4), 164–170. https://doi.org/10.17221/141/2017-JFS

Karaszewski, Z., Łacka, A., Mederski, P. S., & Bembenek, M. (2018). Impact of season and harvester engine RPM on pine wood damage from feed roller spikes. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *39*(2), 183–191.

Kärhä, K., Koivusalo, V., Palander, T., & Ronkanen, M. (2018). Treatment of Picea abies and Pinus sylvestris Stumps with Urea and Phlebiopsis gigantea for Control of Heterobasidion. *Forests*, *9*(3), 139. https://doi.org/10.3390/f9030139

Kärhä, K., Räsänen, M., & Palander, T. (2019). The profitability of cross-cutting practices in butt- rotten Picea abies final-felling stands. *Forests*, *10*(10). https://doi.org/10.3390/f10100874

Kärhä, K., Rönkkö, E., & Gumse, S.-I. (2004). Productivity and Cutting Costs of Thinning Harvesters. *International Journal of Forest Engineering*, *15*(2), 43–56. https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702496

Kellogg, L. D., & Bettinger, P. (1994). Thinning Productivity and Cost for a Mechanized Cut-to-Length System in the Northwest Pacific Coast Region of the USA. *Journal of Forest Engineering*, *5*(2), 43–54. https://doi.org/10.1080/08435243.1994.10702659

Kemmerer, J., & Labelle, E. R. (2021). Using harvester data from on-board computers: a review of key findings, opportunities and challenges. *European Journal of Forest Research*, *140*(1), 1–17. https://doi.org/10.1007/s10342-020-01313-4

Kiljunen, N. (2002). Estimating Dry Mass of Logging Residues from Final Cuttings Using a Harvester Data Management System. *International Journal of Forest Engineering*, *13*(1), 17–25. https://doi.org/10.1080/14942119.2002.10702452

Knobloch, C., Erler, J., Pfanzelt, P., & Richter, L. (2024). Development and Evaluation of a Felling Head for a Light Forest Crawler. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *45*(1), 1–14. https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2048

La Hera, P., Mendoza-Trejo, O., Lindroos, O., Lideskog, H., Lindbäck, T., Latif, S., Li, S., & Karlberg, M. (2024). Exploring the feasibility of autonomous forestry operations: Results from the first experimental unmanned machine. *Journal of Field Robotics*, *41*(4), 942–965. https://doi.org/10.1002/rob.22300

Laar, A. van, & Akça, A. (2007). *Forest Mensuration* (Vol. 13). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5991-9

Laasasenaho, J., Melkas, T., & Aldén, S. (2005). Modelling bark thickness of Picea abies with taper curves. *Forest Ecology and Management*, *206*(1–3), 35–47. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.10.058

Labelle, E., & Huss, L. (2018). Creation of value through a harvester on-board bucking optimization system operated in a spruce stand. *Silva Fennica*, *52*(3). https://doi.org/10.14214/sf.9947

Labelle, E. R., Breinig, L., & Sycheva, E. (2018). Exploring the Use of Harvesters in Large-Diameter Hardwood-Dominated Stands. *Forests*, *9*(7), 424. https://doi.org/10.3390/f9070424

Labelle, E. R., Jaeger, D., & Poltorak, B. J. (2015). Assessing the ability of hardwood and softwood brush mats to distribute applied loads. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *36*(2), 227–242.

Lehtikangas, P. (2001). Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy*, *20*(5), 351–360. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1

Li, R., & Weiskittel, A. R. (2011). Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling approach: comparison of model forms and subsampling strategies. *European Journal of Forest Research*, *130*(2), 219–233. https://doi.org/10.1007/s10342-010-0423-y

Lidén, E. (1995). *Inquiries into harvesting systems, quantities, and machine ownership in Swedish industrial forestry - status 1985/86 and 1992/93 and predictions for 1997/98.*

Liepinš, J., & Liepinš, K. (2015). Evaluation of bark volume of four tree species in Latvia. *Research for Rural Development*, *2*(December), 22–28.

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M. J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, *259*(4), 698–709. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023

Lindroos, O., La Hera, P., & Häggström, C. (2017). Drivers of advances in mechanized timber harvesting - a selective review of technological innovation. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *38*(2), 243–258.

Löwe, R., Sedmíková, M., Natov, P., Dvořák, J., & Jankovský, M. (2019). Analýza neevidovaného objemu dříví v přídavcích k délce výřezů při výrobě smrkového dříví harvestorovou technologií. *Zprávy Lesnického Výzkumu*, *64(4):207-216*. https://www.vulhm.cz/zlv_online_detail/analyza-neevidovaneho-objemu-drivi-v-pridavcich-k-delce-vyrezu-pri-vyrobe-smrkoveho-drivi-harvestorovou-technologii/

Lukáč, T. (2005). *Viacooperačné stroje v lesnom hospodárstve*. Technická univerzita ve Zvolenu.

Lundbäck, M., Häggström, C., & Nordfjell, T. (2021). Worldwide trends in methods for harvesting and extracting industrial roundwood. *International Journal of Forest Engineering*, *32*(3), 202–215. https://doi.org/10.1080/14942119.2021.1906617

Lykidis, C., Kamperidou, V., & Mantanis, G. I. (2023). The Use of Black Pine Bark for Improving the Properties of Wood Pellets. *Forests*, *14*(6), 1069. https://doi.org/10.3390/f14061069

MacDonald, A. J. (1999). *Harvesting systems and equipment in British Columbia (FERIC handbook)*. Forest Engineering Research Institute of Canada. British Columbia. Forest Practices Branch.

Maguire, D. A., & Hann, D. W. (1990). Bark Thickness and Bark Volume in Southwestern Oregon Douglas-Fir. *Western Journal of Applied Forestry*, *5*(1), 5–8. https://doi.org/10.1093/wjaf/5.1.5

Makkonen, I. (2001). *Factors affecting measurement accuracy on processing heads*.

Malmberg, C. (1988). *När skogsbruket började mekanisera. In Anon 1988.* Skogsteknisk forskning och utveckling i Sverige under 50 år. Forskningsstiftelsen.

Marshall, H. D., Murphy, G. E., & Boston, K. (2006). Evaluation of the economic impacts of length and diameter measurement error on mechanical harvesters and processors operating in pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, *36*(7), 1661–1673. https://doi.org/10.1139/x06-064

Marshall, H. D., Murphy, G. E., & Lachenbruch, B. (2006). Effects of bark thickness estimates on optimal log merchandising. *Forest Products Journal*, *56*(11–12), 87–92.

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Orihuela-Equihua, R., López-Albarrán, P., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2015). Calorific value and inorganic material of ten Mexican wood species. *Wood Research*, *60*(2), 281–292.

Marusiak, M., & Neruda, J. (2018). Dynamic soil pressures caused by travelling forest machines. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *39*(2), 233–245.

Mason, W. L., & Alía, R. (2000). Current and future status of Scots pine (Pinus sylvestris L.) forests in Europe. *Forest Systems*, *9*, 317–335. https://doi.org/10.5424/690

McKinley, D. C., Ryan, M. G., Birdsey, R. A., Giardina, C. P., Harmon, M. E., Heath, L. S., Houghton, R. A., Jackson, R. B., Morrison, J. F., Murray, B. C., Pataki, D. E., & Skog, K. E. (2011). A synthesis of current knowledge on forests and carbon storage in the United States. *Ecological Applications*, *21*(6), 1902–1924. https://doi.org/10.1890/10-0697.1

Mederski, P. S., Bembenek, M., Karaszewski, Z., Łacka, A., Szczepańska-Álvarez, A., & Rosińska, M. (2016). Estimating and modelling harvester productivity in pine stands of different ages, densities and thinning intensities. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *37*(1), 27–36.

Mederski, P. S., Bembenek, M., Karaszewski, Z., Pilarek, Z., & Łacka, A. (2018). Investigation of log length accuracy and harvester efficiency in processing of Oak trees. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *39*(2), 173–181.

Mederski, P. S., Karaszewski, Z., Rosińska, M., & Bembenek, M. (2016). Dynamics of harvester fleet change in Poland & factors determining machine occurrence. *Sylwan*, *160*(10), 795–804.

Mederski, P. S., Schweier, J., Đuka, A., Tsioras, P., Bont, L. G., & Bembenek, M. (2022). Mechanised Harvesting of Broadleaved Tree Species in Europe. *Current Forestry Reports*, *8*(1), 1–19. https://doi.org/10.1007/s40725-021-00154-7

Mederski, P. S., Werk, K., Bembenek, M., Karaszewski, Z., Brunka, M., & Naparty, K. (2019). Harvester efficiency in trunk utilisation and log quality of early thinning pine trees. *Forest Research Papers*, *80*(1), 45–53. https://doi.org/10.2478/frp-2019-0004

Melehov, V.-, Tyurikova, T., & Ponomareva, N. (2015). The energy potential of the wood bark in the program of resource-saving. *Actual Directions of Scientific Researches of the XXI Century: Theory and Practice*, *3*(9), 106–110. https://doi.org/10.12737/16877

Mettin, U., Westerberg, S., Shiriaev, A. S., & La Hera, P. X. (2009). Analysis of human-operated motions and trajectory replanning for kinematically redundant manipulators. *2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 795–800. https://doi.org/10.1109/IROS.2009.5354362

Miettinen, M., Kulovesi, J., Kalmari, J., & Visala, A. (2010). *New Measurement Concept for Forest Harvester Head* (pp. 35–44). https://doi.org/10.1007/978-3-642-13408-1_4

Miles, P. D., & Smith, W. Brad. (2009). *Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America*. https://doi.org/10.2737/NRS-RN-38

Ministry of Business Innovation &Employment. (2012). *Approved code of practice for safety and health in forest operations.* (Issue December). https://www.worksafe.govt.nz/topic-and-industry/forestry/safety-and-health-in-forest-operations/

Molnár, S. (2004). *Faanyagismeret ("Wood Science"), Mezőgazdasági Szaktudás kiadó*.

Morales, D. O., Hera, P. La, Westerberg, S., Freidovich, L. B., & Shiriaev, A. S. (2014). Path-Constrained Motion Analysis: An Algorithm to Understand Human Performance on Hydraulic Manipulators. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, *45*(2), 187–199. https://doi.org/10.1109/THMS.2014.2366873

Mosaffaei, Z., & Jahani, A. (2021). Modeling of ash (Fraxinus excelsior) bark thickness in urban forests using artificial neural network (ANN) and regression models. *Modeling Earth Systems and Environment*, *7*(3), 1443–1452. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00869-9

Moskalik, T., Borz, A., Dvořák, J., Ferencik, M., Glushkov, S., Muiste, P., Lazdiņš, A., & Styranivsky, O. (2017). Timber Harvesting Methods in Eastern European Countries: a Review. In *Croat. j. for. eng* (Vol. 38, Issue 2).

Musić, J., Halilović, V., Knežević, J., Avdagić, A., Ibrahimspahić, A., Balić, B., & Lojo, A. (2019). Modelling Bark Thickness of Norway Spruce (Picea abies Karst). *South-East European Forestry*, *10*(2), 125–135. https://doi.org/10.15177/seefor.19-17

MZe. (2019). *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2018*. https://mze.gov.cz/public/portal/mze/publikace/Zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-CR/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-4

MZe. (2020). *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2019*. https://mze.gov.cz/public/portal/mze/publikace/Zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-CR/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-2019

MZe. (2021). *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2020*. https://mze.gov.cz/public/portal/mze/publikace/Zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-CR/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-2020

MZe. (2022). *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2021*. https://mze.gov.cz/public/portal/mze/publikace/Zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-hospodarstvi-CR/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho-2021

MZe. (2023). *Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství 2022*. 57–57. https://eagri.cz/public/web/mze/lesy/lesnictvi/zprava-o-stavu-lesa-a-lesniho/

Naghdi, R., Jalali, A. M., Mohamadi, K., & Akbarimehr, M. (2011). Effects of selection and shelterwood method on quality and quantity of trees along skid trails in beech (Fagus orientalis, Lipsky) forests. *Journal of Forest Science*, *57*(10), 459–465. https://doi.org/10.17221/132/2010-JFS

Natov, P., & Dvořák, J. (2018). *Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018*. Produkce BPP s.r.o.

Neruda, J., Simanov, V., Klvač, R., Skoupý, A., Kadlec, J., Zemánek, T., & Nevrkla, P. (2015). *Technika a technologie v lesnictví* (Díl druhý). Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta.

Neruda, J., Ulrich, R., Kupčák, V., Slodičák, M., & Zemánek, T. (2022). *Harvestorové technologie lesní těžby*. Mendelova univerzita v Brně, Lesnická a dřevařská fakulta. https://ut.ldf.mendelu.cz/wcd/w-ldf-ut/soubory/htlt_skriptum.pdf

Nieuwenhuis, M., & Dooley, T. (2006). The Effect of Calibration on the Accuracy of Harvester Measurements. *International Journal of Forest Engineering*, *17*(2), 25–33. https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702533

Nordfjell, T., Öhman, E., Lindroos, O., & Ager, B. (2019). The technical development of forwarders in Sweden between 1962 and 2012 and of sales between 1975 and 2017. *International Journal of Forest Engineering*, *30*(1), 1–13. https://doi.org/10.1080/14942119.2019.1591074

Novák, J., Dušek, D., & Slodičák, M. (2019). *Modely výchovy jehličnatých porostů pro harvestorové technologie* (Certifikov). Strnady: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti.

Nurminen, T., Korpunen, H., & Uusitalo, J. (2006). Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica*, *40*(2). https://doi.org/10.14214/sf.346

Nuutinen, Y., Väätäinen, K., Asikainen, A., Prinz, R., & Heinonen, J. (2010). Operational efficiency and damage to sawlogs by feed rollers of the harvester head. *Silva Fennica*, *44*(1). https://doi.org/10.14214/sf.165

Öhman, M., Miettinen, M., Kannas, K., Jutila, J., Visala, A., & Forsman, P. (2008). Tree Measurement and Simultaneous Localization and Mapping System for Forest Harvesters. In *Field and Service Robotics* (pp. 369–378). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75404-6_35

Oliveira, L. F. P., Moreira, A. P., & Silva, M. F. (2021). Advances in Forest Robotics: A State-of-the-Art Survey. *Robotics*, *10*(2), 53. https://doi.org/10.3390/robotics10020053

Östberg, M. (1990). *En smedjas förvandling - ÖSAs historia*. Nyströms tryckeri.

Ovaskainen, H., Uusitalo, J., & Väätäinen, K. (2004). Characteristics and Significance of a Harvester Operators' Working Technique in Thinnings. *International Journal of Forest Engineering*, *15*(2), 67–77. https://doi.org/10.1080/14942119.2004.10702498

Pajkoš, M., Klvač, R., Neruda, J., & Kumar Mishra, P. (2018). Comparative Time Study of Conventional Cut-To-Length and an Integrated Harvesting Method—A Case Study. *Forests*, *9*(4), 194. https://doi.org/10.3390/f9040194

Palander, T., Nuutinen, Y., Kariniemi, A., & Väätäinen, K. (2013). Automatic Time Study Method for Recording Work Phase Times of Timber Harvesting. *Forest Science*, *59*(4), 472–483. https://doi.org/10.5849/forsci.12-009

Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., Phillips, O. L., Shvidenko, A., Lewis, S. L., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Pacala, S. W., McGuire, A. D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., & Hayes, D. (2011). A Large and

Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, *333*(6045), 988–993. https://doi.org/10.1126/science.1201609

Parikka, M. (2004). Global biomass fuel resources. *Biomass and Bioenergy*, *27*(6), 613–620. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.005

Pásztory, Z., Mohácsiné, I. R., Gorbacheva, G., & Börcsök, Z. (2016). The utilization of tree bark. *BioResources*, *11*(3), 7859–7888. https://doi.org/10.15376/biores.11.3.Pasztory

Peltola, A. (2003). *IT-time for Mechanised Forest Work Study*. Skogsforsk Arbetsrap. 536:107–112.

Peltola, H., Kellomäki, S., Hassinen, A., & Granander, M. (2000). Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. *Forest Ecology and Management*, *135*(1–3), 143–153. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00306-6

Pizzi, A. (2016). Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science*, *73*(1), 185–203. https://doi.org/10.1007/s13595-014-0448-3

Pokorný, P., Hošková, K., Prach, J., Šída, P., & Bednář, P. (2024). Nová paleobotanická data prokazují původní status modřínu opadavého (Larix decidua Mill.) v severních Čechách. *Zprávy Lesnického Výzkumu*, *68*(4). https://doi.org/10.59269/zlv/2023/4/707

Popp, M. P., Johnson, J. D., & Massey, T. L. (1991). Stimulation of resin flow in slash and loblolly pine by bark beetle vectored fungi. *Canadian Journal of Forest Research*, *21*(7), 1124–1126. https://doi.org/10.1139/x91-155

Porter, M. E. (1985). TECHNOLOGY AND COMPETITIVE ADVANTAGE. *Journal of Business Strategy*, *5*(3), 60–78. https://doi.org/10.1108/eb039075

Prinz, R., Väätäinen, K., & Routa, J. (2021). Cutting duration and performance parameters of a harvester's sawing unit under real working conditions. *European Journal of Forest Research*, *140*(1), 147–157. https://doi.org/10.1007/s10342-020-01320-5

Pucher, C., Erber, G., & Hasenauer, H. (2023). Europe's Potential Wood Supply by Harvesting System. *Forests*, *14*(2), 398. https://doi.org/10.3390/f14020398

Purfuerst, F. T. (2010). Learning Curves of Harvester Operators. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *31*(2), 89–97.

Quesnel, H. J., & Curran, M. P. (2000). Shelterwood harvesting in root-disease infected stands — post-harvest soil disturbance and compaction. *Forest Ecology and Management*, *133*(1–2), 89–113. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00301-1

Rápóti, J., & Romváry, V. (1997). Gyógyító Növények ("Healing plants"). *Medicina Könyvkiadó Rt, Budapest, Hungary*.

Rasinmäki, J., & Melkas, T. (2005). A method for estimating tree composition and volume using harvester data. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *20*(1), 85–95. https://doi.org/10.1080/02827580510008185

Rimondi, V., Costagliola, P., Benesperi, R., Benvenuti, M., Beutel, M. W., Buccianti, A., Chiarantini, L., Lattanzi, P., Medas, D., & Parrini, P. (2020). Black pine (Pinus nigra) barks: A critical evaluation of some sampling and analysis parameters for mercury biomonitoring purposes. *Ecological Indicators*, *112*(August 2019), 2014–2021. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106110

Ringdahl, O. (2011). *Automation in Forestry – Development of Unmanned Forwarders*. http://umu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:412664

Ringdahl, O., Hellström, T., & Lindroos, O. (2012). Potentials of possible machine systems for directly loading logs in cut-to-length harvesting. *Canadian Journal of Forest Research*, *42*(5), 970–985. https://doi.org/10.1139/X2012-036

Ringdahl, O., Lindroos, O., Hellström, T., Bergström, D., Athanassiadis, D., & Nordfjell, T. (2011). Path tracking in forest terrain by an autonomous forwarder. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *26*(4), 350–359. https://doi.org/10.1080/02827581.2011.566889

Rodriguez-Vallejo, C., & Navarro-Cerrillo, R. M. (2019). Contrasting Response to Drought and Climate of Planted and Natural Pinus pinaster Aiton Forests in Southern Spain. *Forests*, *10*(7), 603. https://doi.org/10.3390/f10070603

Roszyk, E., Mania, P., Iwańska, E., Kusiak, W., & Broda, M. (2020). Mechanical performance of Scots pine wood from northwestern Poland – A case study. *BioResources*, *15*(3), 6781–6794. https://doi.org/10.15376/biores.15.3.6781-6794

Routa, J., Kellomaki, S., Peltola, H., & Asikainen, A. (2011). Impacts of thinning and fertilization on timber and energy wood production in Norway spruce and Scots pine: scenario analyses based on ecosystem model simulations. *Forestry*, *84*(2), 159–175. https://doi.org/10.1093/forestry/cpr003

Sanktjohannser, D. (2019). *Harvesterköpfe zur Bearbeitung von Laubholz – Aktuelle Literaturübersicht (harvesterheads for hardwood – current overview)* [Bakalářská práce]. Technische Universität Dresden, Tharandt.

San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., G., C., Houston Durrant, T., Mauri, A., Tinner, W., Ballian, D., Beck, P., Birks, H. J. B., Eaton, E., Enescu, C. M., Pasta, S., Popescu, I., Ravazzi, C., Welk, E., Abad Viñas, R., Azevedo, J. C., Barbati, A., & Barre, B. (2016). *European Atlas of Forest Tree Species* (Vol. 11, Issue April). European Commission, Publications Office of the European Union. https://doi.org/10.2760/233115

Šarman, L. (2019). *Prokázání důvěryhodnosti metody příjmu dříví dle výstupů z harvestorů a navržení kontrolně-výrobního SW pro všechny harvestory pracující u LČR*. https://lesycr.cz/wp-content/uploads/2018/01/ZZ_metody-prijmu-drivi_harvestory_13_2017_web.pdf

Sarvašová, Z., Zivojinovic, I., Weiss, G., Dobšinská, Z., Drăgoi, M., Gál, J., Jarský, V., Mizaraite, D., Põllumäe, P., Šálka, J., Schiberna, E., Šišák, L., Wolfslehner, B., Zalite, Z., & Zalitis, T. (2015). Forest Owners Associations in the Central and Eastern European Region. *Small-Scale Forestry*, *14*(2), 217–232. https://doi.org/10.1007/s11842-014-9283-5

Schlaghamerský, A. (2001). Harvestorové technologie v lesních porostech. *Lesnická Práce*, *Ročník 80 (2001), č. 4/01*. https://www.lesprace.cz/casopis-lesnicka-prace-archiv/rocnik-80-2001/lesnicka-prace-c-4-01/harvestorove-technologie-v-lesnich-porostech

SEF. (2020). *Forest Europe. State of Europe's Forests 2020*. https://foresteurope.org/wp-content/uploads/2016/08/SoEF_2020.pdf

Silversides, C. R. (1997). *Broadaxe to flying shear : the mechanization of forest harvesting east of the Rockies*. National Museum of Science and Technology.

Skogforsk. (2012a). *StanForD* (Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden. Project StanForD Classic Documents). https://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/

Skogforsk. (2012b). *StanForD - Appendix: Definitions of variables - General and country specific* (Skogforsk the Forest Research Institute of Sweden). https://www.skogforsk.se/cd_20190114161714/contentassets/b063db555a664ff8b515ce121f4a42d1/appendix1_eng_120418.pdf

Sládek, P., & Neruda, J. (2007). Analysis of Volume Differences in Measuring Timber in Forestry and Wood Industry. *40th International Symposium on Forestry Mechanisation: "Meeting the Needs of Tomorrows´ Forests – New Developments in Forest Engineering," DI*, 1–11.

Sobol, Ł., Sabat, D., & Dyjakon, A. (2023). Assessment of Bark Properties from Various Tree Species in Terms of Its Hydrophobicity and Energy Suitability. *Energies*, *16*(18), 6586. https://doi.org/10.3390/en16186586

Söderberg, J., Wallerman, J., Almäng, A., Möller, J. J., & Willén, E. (2021). Operational prediction of forest attributes using standardised harvester data and airborne laser scanning data in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *36*(4), 306–314. https://doi.org/10.1080/02827581.2021.1919751

Sonmez, T., Keles, S., & Tilki, F. (2007). Effect of aspect, tree age and tree diameter on bark thickness of Picea orientalis. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *22*(3), 193–197. https://doi.org/10.1080/02827580701314716

Stampfer, K. (1999). *Influence of Terrain Conditions and Thinning Regimes on Productivity of a Track-Based Steep Slope Harvester*. 78–87.

Stampfer, K., & Steinmüller, T. (2001). A New Approach To Derive A Productivity Model for the Harvester "Valmet 911 Snake" *International Mountain Logging and 11th Pacific Northwest Skyline Symposium*, 254–262.

Stängle, S. M., & Dormann, C. F. (2018). Modelling the variation of bark thickness within and between European silver fir (Abies alba Mill.) trees in southwest Germany. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, *91*(3), 283–294. https://doi.org/10.1093/forestry/cpx047

Stängle, S. M., Sauter, U. H., & Dormann, C. F. (2017). Comparison of models for estimating bark thickness of Picea abies in southwest Germany: the role of tree, stand, and environmental factors. *Annals of Forest Science*, *74*(1), 16. https://doi.org/10.1007/s13595-016-0601-2

Stängle, S. M., Weiskittel, A. R., Dormann, C. F., & Brüchert, F. (2016). Measurement and prediction of bark thickness in Picea abies : assessment of accuracy, precision, and sample size requirements. *Canadian Journal of Forest Research*, *46*(1), 39–47. https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0263

Strandgard, M., Alam, M., & Mitchell, R. (2014). Impact of slope on productivity of a self-levelling processor. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *35*(2), 193–200.

Strubergs, A., Lazdins, A., & Sisenis, L. (2020). *Evaluation of compliance of existing forest machine information systems for the implementation of the standard StanForD 2010*. 66–72. https://doi.org/10.22616/rrd.26.2020.010

Sundberg, U. (1978). *Teknik i skog. In: Skogshögskolan 150 år. Problem och idéer i svenskt skogsbruk 1828-1978. [Technology in the forest. In: The Royal Collage of Forestry 150 years. Problems and ideas in Swedish forestry 1828-1978]*. Liber förlag.

Sutherland, B. (2012). *Review of Tethered Equipment for Steep-Slope Operations. Steep slope workshop*. FPInnovations.

Szewczyk, G., & Sowa, J. M. (2017). The accuracy of measurements in a time study of harvester operations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, *47*(1), 24. https://doi.org/10.1186/s40490-017-0105-3

Talbot, B., Nordfjell, T., & Suadicani, K. (2003). Assessing the Utility of Two Integrated Harvester-Forwarder Machine Concepts Through Stand-Level Simulation. *International Journal of Forest Engineering*, *14*(2), 31–43. https://doi.org/10.1080/14942119.2003.10702476

Tanase, C., Coșarcă, S., & Muntean, D.-L. (2019). A Critical Review of Phenolic Compounds Extracted from the Bark of Woody Vascular Plants and Their Potential Biological Activity. *Molecules*, *24*(6), 1182. https://doi.org/10.3390/molecules24061182

Thomas, R. E., & Bennett, N. D. (2014). Estimating Bark Thicknesses of Common Appalachian Hardwoods. *Proceedings of the 19th Central Hardwood Forest Conference-GTR-NRS-P-142*, 283–294. https://www.fs.fed.us/nrs/pubs/gtr/gtr_nrs-p-142.pdf

Tufts, R. A. (1997). Productivity and cost of the ponsse 15-series, cut-to-length harvesting system in southern pine plantations. *Forest Products Journal*, *47*(10), 39–46.

Ulrich, R., Schlaghamerský, A., & Štorek, V. (2002). *oužití harvestorové technologie v probírkách*. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.

Úradníček, L., Maděra, P., Tichá, S., & Koblížek, J. (2001). *Dřeviny České republiky* (2. přeprac). Kostelec nad Černými Lesy : Lesnická práce, 2009.

Ushanova, V. M. (2012). *Complex Processing of Siberian Fir Needles and Bark for Obtaining Products Having Biological Activity* [Disertační práce]. Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, Russia.

Valenta, J. (2015). *Zjišťování objemu modřínových a douglaskových výřezů*. *Lesnická práce, 94: 454-456.*

Verkerk, P. J., Anttila, P., Eggers, J., Lindner, M., & Asikainen, A. (2011). The realisable potential supply of woody biomass from forests in the European Union. *Forest Ecology and Management*, *261*(11), 2007–2015. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.027

Visser, R., & Obi, O. F. (2021). Automation and Robotics in Forest Harvesting Operations. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *42*(1), 13–24. https://doi.org/10.5552/crojfe.2021.739

Visser, R., & Spinelli, R. (2012). Determining the shape of the productivity function for mechanized felling and felling-processing. *Journal of Forest Research*, *17*(5), 397–402. https://doi.org/10.1007/s10310-011-0313-2

Visser, R., & Stampfer, K. (2015). Expanding ground-based harvesting onto steep terrain: A review. *Croatian Journal of Forest Engineering*, *36*(2), 321–331.

Wehenkel, C., Cruz-Cobos, F., Carrillo, A., & Lujan-Soto, J. E. (2012). Estimating bark volumes for 16 native tree species on the Sierra Madre Occidental, Mexico.

Scandinavian Journal of Forest Research, *27*(6), 578–585. https://doi.org/10.1080/02827581.2012.661453

Wenig, C., Dunlop, J. W. C., Hehemeyer-Cürten, J., Reppe, F. J., Horbelt, N., Krauthausen, K., Fratzl, P., & Eder, M. (2021). Advanced materials design based on waste wood and bark. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *379*(2206). https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0345

West, P. W. (2004). *Tree and Forest Measurement*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05436-9

Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spångberg, K., Lundqvist, S.-O., Grahn, T., Hedenberg, Ö., & Olsson, L. (2002). Models for Predicting Wood Properties in Stems of Picea abies and Pinus sylvestris in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research*, *17*(4), 330–350. https://doi.org/10.1080/02827580260138080

Williams, D. W., & Liebhold, A. M. (2002). Climate change and the outbreak ranges of two North American bark beetles. *Agricultural and Forest Entomology*, *4*(2), 87–99. https://doi.org/10.1046/j.1461-9563.2002.00124.x

Williams, V. L., Witkowski, E. T. F., & Balkwill, K. (2007). Relationship between bark thickness and diameter at breast height for six tree species used medicinally in South Africa. *South African Journal of Botany*, *73*(3), 449–465. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2007.04.001

Wojnar, T. (2007). *Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v České republice 2008* (2. aktuali). Lesnická práce: Kostelec nad Černými lesy.

Xenakis, G., Ray, D., & Mencuccini, M. (2012). Effects of climate and site characteristics on Scots pine growth. *European Journal of Forest Research*, *131*(2), 427–439. https://doi.org/10.1007/s10342-011-0516-2

Yang, P., & Jenkins, B. M. (2008). Wood residues from sawmills in California. *Biomass and Bioenergy*, *32*(2), 101–108. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.09.001

Yilmaz, E., Ozdemir, E., & Makineci, E. (2021). Bark thickness models for oak forests being converted from coppice to high forests in Northwestern Turkey.

Environmental Monitoring and Assessment, *193*(11), 728. https://doi.org/10.1007/s10661-021-09524-x

Zacco, P. (1974). *Barktjockleken hos sågtimmer: the bark thickness of saw logs*. Swedish Royal College of Forestry, Department of Forest Products.

Zeibig-Kichas, N. E., Ardis, C. W., Berrill, J.-P., & King, J. P. (2016). Bark Thickness Equations for Mixed-Conifer Forest Type in Klamath and Sierra Nevada Mountains of California. *International Journal of Forestry Research*, *2016*, 1–10. https://doi.org/10.1155/2016/1864039

Zhao, Q., Mäkinen, M., Haapala, A., & Jänis, J. (2021). Valorization of Bark from Short Rotation Trees by Temperature-Programmed Slow Pyrolysis. *ACS Omega*, *6*(14), 9771–9779. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00434

Zlatuška, K., Bystrický, R., Ježek, J., Natov, P., Sekanina, A., & Tománek, J. (2020). *Technická doporučení pro projektování lesní dopravní sítě*. Ministerstvo zemědělství ve spolupráci s Českou zemědělskou univerzitou v Praze.